

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de master

Présenté à l'Université 08 mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux en Génie civil

Présenté par :

Sahri Mohamed Amine

Elagoune Mouhamed Akram

---

---

**Thème : *Caractérisation d'un liant hydraulique à base de la poudre de verre -Etat de l'art-***

---

---

Sous la direction de : Dr. Nigri Ghania

---

Septembre 2020

---

# Remerciements

*Nous remercions Allah, le tout puissant, le miséricordieux, qui nous a appris ce que nous l'ignorions, de nous avoir donné la santé et tout ce dont nous avons besoin pour réaliser le travail demandé et rédiger ce mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent A: Madame Nigri Ghania, docteur à l'Université de Guelma, notre directrice de mémoire d'avoir accepté de nous encadrer et pour la confiance qu'elle nous a accordée tout au long de ce travail, pour son soutien et son aide à la recherche des solutions adaptées aux difficultés que nous avons rencontré au cours de la réalisation de ce mémoire, mais aussi et surtout pour ses qualités humaines. Que ce travail soit le témoin de la reconnaissance et le respect que nous la voue.*

*Nous remercions l'ensemble du corps des enseignants et administratifs du département de génie civil et d'hydraulique de la faculté des sciences et de la technologie de l'Université 8 mai 1945 de Guelma.*

*Nos remerciements les plus profonds à nos chères familles pour leur soutien moral indéfectible et leurs encouragements.*

*Enfin, nos remerciements à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# Dédicaces



*Nous dédions ce travail à nos parents*

*Nôtre gratitude pour leur soutien tout le long de nos études*

*À notre deuxième mère Nigri Ghania*

*À nos frères et à nos sœurs*

*À nos amis et à toute la famille*

*Merci à TOUS !*

# Résumé

Le ciment et le mortier sont des matériaux très importants pour la réalisation des bâtiments civils et industriels, des chaussées rigides et des ouvrages d'art. La multiplication des variétés de ces produits en fonction de chaque usage, nécessite des caractéristiques spécifiques et consomme beaucoup d'énergie. Raison pour laquelle, la création de nouveaux matériaux de construction moins coûteux et adaptés aux usages de leur utilisation est devenue une avenue très intéressante dans l'industrie du ciment. En plus, elle permet l'exploitation des résidus industriels et contribue à résoudre les problèmes liés à la fabrication du ciment.

L'objectif principal de ce travail est de collecter des informations sur le comportement des ciments fabriqués à base de la poudre de verre finement broyée. L'analyse et la comparaison des résultats des travaux de recherche menés sur la valorisation de la poussière de verre comme remplacement partiel dans la fabrication du ciment a conduit à améliorer la performance du ciment, mortier et béton.

Mots clés : Ciment, Ajouts cimentaire, Poudre de verre, Comportement mécanique.

# ملخص

يعتبر الإسمنت والملاط من المواد المهمة جداً لتشييد المباني المدنية والصناعية والأرصفة الصلبة والهياكل. يتطلب تكاثر أصناف هذه المنتوجات وفقاً لكل استخدام خصائص محددة ويستهلك الكثير من الطاقة. لهذا السبب ، أصبح إنشاء مواد بناء جديدة أقل تكلفة وتكيفاً مع استخدامات استخدامها وسيلة مثيرة للاهتمام للغاية في صناعة الإسمنت بالإضافة إلى أنه يسمح باستغلال المخلفات الصناعية ويساعد على حل المشكلات المرتبطة بصناعة الإسمنت.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو جمع معلومات عن سلوك الإسمنت بناءً على مسحوق الزجاج المطحون ناعماً. أدى تحليل ومقارنة نتائج الأبحاث التي أجريت على استعادة غبار الزجاج كبديل جزئي في صناعة الإسمنت إلى تحسين أداء الإسمنت والملاط والخرسانة.

الكلمات المفتاحية : الإسمنت ، إضافات الإسمنت ، مسحوق الزجاج ، السلوك الميكانيكي

# Abstract

Cement and mortar are very important materials for the construction of civil and industrial buildings, rigid pavements and engineering structures. The multiplication of the varieties of these products according to each use requires specific characteristics and consumes a lot of energy. For this reason, the creation of new construction materials that are less expensive and adapted to the uses of their uses has become a very interesting avenue in the cement industry. In addition, it allows the exploitation of industrial residues and helps to solve the problems associated with the manufacture of cement.

The main objective of this work is to collect information on the behavior of cements made from finely ground glass powder. The analysis and comparison of the results of research carried out on the valorization of glass dust as a partial replacement in the manufacture of cement has led to improved performance of cement, mortar and concrete.

Keywords: Cement, Cement additions, Glass powder, Mechanical behavior.

# SOMMAIRE

**Remerciements**

**Dédicace**

**Résumés..... i-iii**

**Liste des figures..... I-II**

**Liste des tableaux..... III**

---

**Page**

**Introduction générale..... 1-2**

## **Chapitre 1 : Généralités sur les ciments**

**1.1. Introduction..... 3**

**1.2. Constituants du ciment..... 4**

1.2.1. Clinker portland..... 4

1.2.2. Laitier de haut fourneau..... 4

1.2.3. Fumé de silice..... 5

1.2.4. Sulfate de calcium..... 5

1.2.5. Cendres volantes..... 6

1.2.6. Fillers..... 6

1.2.7. Schistes calcinés..... 7

1.2.8. Calcaire..... 7

1.2.9. Constituants mineurs du ciment..... 8

**1.3. Classification du ciment..... 8**

1.3.1. En fonction de leur composition..... 8

1.3.2. En fonction de leur résistance normale..... 9

## SOMMAIRE

---

1.3.3. Ciment adaptés à des usages spécifique.....	9
<b>1.4. Procédé de fabrication du ciment portland.....</b>	<b>10</b>
1.4.1. Extraction et concassage.....	10
1.4.2. Préparation des matières premières.....	11
1.4.3. Cuisson de cru.....	12
1.4.4. Broyage du clinker et élaboration de ciment.....	13
<b>1.5. Hydratation du ciment portland.....</b>	<b>13</b>
1.5.1. Hydratation des phases du ciment.....	14
1.5.1.1. Hydratation des silicates C3S et C2S.....	14
1.5.1.2. Hydratation des phases aluminates.....	16
1.5.2. L'aspect cinétique.....	17
<b>1.6. Evolution des propriétés du ciment portland.....</b>	<b>19</b>
<b>Références bibliographiques de premier chapitre.....</b>	<b>20</b>

## Chapitre 2 : Généralité sur les déchets

<b>2.1. Introduction.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2. Définition des déchets.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3. Classification des déchets.....</b>	<b>23</b>
2.3.1. Déchets solides dangereux.....	23
2.3.2. Déchets solides non dangereux.....	24
2.3.3. Déchets inertes.....	26
<b>2.4. Gestion des déchets.....</b>	<b>28</b>
2.4.1. Méthode de gestion des déchets.....	29
2.4.1.1 Décharge.....	29
2.4.1.2. L'enfouissement.....	29
2.4.1.3. L'incinération.....	29
2.4.1.4. La décharge contrôlée.....	30

## SOMMAIRE

---

2.4.1.5. Le compostage.....	30
2.4.1.6. Le recyclage.....	30
2.4.1.7. Collectes, Transport et stockage des déchets.....	31
2.4.1.8. Station de transfert.....	32
<b>2.5. Traitement des déchets.....</b>	<b>33</b>
2.5.1. Valorisation matière.....	33
2.5.2. Valorisation thermique.....	35
2.5.3. Stockage et Stabilisation pour les déchets dangereux .....	36
<b>Références bibliographiques de deuxième chapitre.....</b>	<b>37</b>

### **Chapitre 3 : Valorisation des déchets de verre dans le domaine de génie civil**

<b>3.1. Introduction .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2. Historique.....</b>	<b>38</b>
<b>3.3. Définition du verre.....</b>	<b>39</b>
<b>3.4. Structure du verre.....</b>	<b>39</b>
3.4.1. Composition chimique du verre.....	39
3.4.2. Structure vitreuse du verre.....	39
<b>3.5. Composants du verre.....</b>	<b>43</b>
3.5.1. Les vitrifiant.....	43
3.5.2. Le fondant.....	44
3.5.3. Le stabilisant.....	44
3.5.4. Colorants.....	44
3.5.5. Les affinant.....	44

## SOMMAIRE

---

<b>3.6. Valorisations de poudre de verre en génie civil.....</b>	<b>44</b>
3.6.1. Utilisation de la poudre de verre comme substituant du ciment....	45
3.6.2. Préparation de la poudre de verre.....	45
3.6.3. Réaction pouzzolanique (ciment-verre).....	46
3.6.4. Facteurs influençant la réaction pouzzolanique.....	46
3.6.5. La réaction alcali-silice (ciment –verre).....	47
3.6.6. Rôle des pouzzolanes dans la réduction des expansions dues a la réaction alcali-silice (ciment -verre).....	49
3.6.7. Résistance à la compression des mortiers formulés à base de la poudre de verre.....	50
<b>3.7 .Comparaison des études.....</b>	<b>50</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>56</b>
<b>Références bibliographiques de troisième chapitre.....</b>	<b>57</b>
<b>Conclusions générales.....</b>	<b>59</b>

# LISTE DES FIGURES

<b>Réf figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Figure 1.1.</b>	Procédé de fabrication du ciment.....	13
<b>Figure 1.2.</b>	C-S-H en fibre.....	15
<b>Figure 1.3.</b>	gel de C-S-H.....	15
<b>Figure 1.4.</b>	Ca(OH) <sub>2</sub> et CSH.....	15
<b>Figure 1.5.</b>	Cristaux de Portlandite.....	15
<b>Figure 1.6.</b>	Aiguilles d'ettringite.....	17
<b>Figure 1.7.</b>	Monosulfoaluminate hydraté.....	17
<b>Figure 1.8.</b>	Les différentes périodes de la courbe calorimétrique lors de l'hydratation des silicates tricalciques C3S en pate.....	18
<b>Figure 1.9.</b>	Courbe d'avancement d'une hydratation de C3S.....	19
<b>Figure 2.1.</b>	Les Types déchets solides.....	27
<b>Figure 2.2.</b>	Les principales étapes de transport.....	32
<b>Figure 3.1.</b>	Diffractogramme des rayons «X» du verre.....	40
<b>Figure 3.2.</b>	a) Structure en anneau de la Cristobalite. ....	41
	b) les tétraèdres dans les trois dimensions.....	41
<b>Figure 3.3.</b>	a) l'empilement des atomes de la silice amorphe.....	42
	b) l'adjonction de Na <sub>2</sub> O et CaO .....	42
<b>Figure 3.4.</b>	Variation spécifique du verre avec la température, relation entre les états solide, liquide et vitreux au verre sodo-calcique.....	42
<b>Figure 3.5.</b>	Position du verre dans le système CaO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	43
<b>Figure 3.6.</b>	Verre recyclé (la poudre et agrégats) dans le béton non structural.....	45
<b>Figure 3.7.</b>	Broyeur à boulets.....	46
<b>Figure 3.8.</b>	Poudre de verre générée.....	46

<b>Figure 3.9.</b>	Activité pouzzolanique de la poudre de verre.....	47
<b>Figure 3.10.</b>	Expansion due à la RAG sur des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles.....	48
<b>Figure 3.11.</b>	Resistance à la réaction alcalis-granulat des bétons, 38°C et 100% HR.....	48
<b>Figure 3.12.</b>	Expansion due a la RAG a 23°C.....	49
<b>Figure 3.13.</b>	Resistance à la compression des mortiers incorporant la poudre de verre..	50

# LISTE DES TABLEAUX

Réf tableau.	Titre	page
Tableau 1.1.	Types de ciments avec leurs compositions correspondantes.....	8
Tableau 1.2.	Valeurs des limites caractéristiques des classes de ciments.....	9
Tableau 2.1.	Classification des déchets en Polynésie française 2018.....	28
Tableau 2.2.	Classement des solutions de traitement des déchets les plus importants....	36
Tableau 3.1.	Composition chimique du verre.....	39
Tableau 3.2.	Mélange des ciments étudiés.....	51
Tableau 3.3.	Résistances mécaniques des mortiers en fonction du taux de verre.....	51
Tableau 3.4.	Résistances mécanique des mortiers en fonction du taux de poudre de Verre.....	52
Tableau 3.5.	Evolution des résistances mécanique des mortiers en fonction du taux de poudre de verre.....	53
Tableau 3.6.	L'évolution de la résistance à la compression et la flexion en fonction du temps à court terme des mortiers M0, M15, M20, M25.....	54
Tableau 3.7.	L'évolution de la résistance à la compression et la flexion en fonction du temps à long terme des mortiers M0, M10, M20, M35.....	55

# INTRODUCTION GENERALE

# INTRODUCTION GENERALE

Ce travail de recherche s'inscrit dans le contexte d'une étude sur la valorisation des déchets de l'industrie dans la fabrication du ciment et la formulation du béton. Cette valorisation a été largement étudiée ces dernières années en raison de leurs impacts :

➤ Environnemental : Le dégagement de  $\text{CO}_2$  est de l'ordre de 850 kg par tonne de clinker Portland produite. L'émission de  $\text{CO}_2$  par l'industrie cimentière peut être limitée en agissant sur le point de utilisation de matières premières de substitution pour la fabrication du clinker ou procéder à des ajouts au clinker (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes, etc.) et réduire ainsi le phénomène de décarbonatation du calcaire. L'utilisation des ajouts cimentaires permet aussi de préserver les ressources naturelles non renouvelables nécessaires à la production du clinker (argile, calcaire et combustibles fossiles).

➤ Techniques, les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, L'imperméabilité et la résistance aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent d'obtenir des ciments composées à faible chaleur d'hydratation, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration d'origine thermique (réduction du retrait).

➤ Economique, le ciment portland est le composant le plus onéreux au cours de la Production du béton, puisque la plupart des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits moins coûteux que le ciment portland (le coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation) ce qui a pour conséquence de réduire le prix de revient du matériau béton.

Les sous-produits de l'industrie qui ont été valorisés présentent des propriétés pouzzolaniques (cas des cendres volantes, et de la fumée de silice) et/ou hydrauliques latentes (cas des laitiers de haut fourneau). Dans ce travail, on s'intéresse à l'utilisation de la poudre de verre comme ajout cimentaire. Plusieurs études ont confirmées que l'utilisation des déchets de verres broyés peut être une avenue très intéressante dans l'industrie du ciment et béton du fait que le verre est un matériau amorphe avec une composition chimique proche des autres ajouts connus (Fumée de silice, Laitier, Cendre volante).

Ce travail a été proposé au départ comme un sujet de travail expérimental est devenu ensuite une recherche bibliographique suite au confinement lié au corona-virus covid 19. Il consiste maintenant à une étude bibliographique sur la valorisation la poudre des déchets de verre dans

## Introduction Générale

---

la fabrication du ciment. Ces déchets se trouvent relativement en abondance en Algérie et restent peu ou pas recyclés jusqu'à présent. Plusieurs travaux de recherches ont trouvé que le broyage du verre à une plus grande finesse laisse envisager une utilisation de ce matériau en tant que liant. Dans ce cas, la silice du verre réagit avec la chaux produite par la réaction d'hydratation du ciment (réaction pouzzolanique), créant ainsi des composés dotés de propriétés liantes.

Le mémoire, construit en trois chapitres, le premier chapitre est une analyse de la bibliographie sur la l'industrie et le produit ciment (composition, fabrication hydratation), le deuxième chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur les déchets (définitions, classifications, et traitements). Dans le troisième chapitre nous exposons l'ensemble des résultats des études menées sur la valorisation des déchets de verre dans le Génie Civil et plus particulièrement dans l'industrie cimentaire (traitement, taux d'utilisation, meilleurs résultats trouvés).

Enfin, le manuscrit est clôturé par une conclusion générale qui résume les principaux axes décrivant une future étude expérimentale.

# CHAPITRE 1 :

## GENERALITES SUR LES CIMENTS

*Ce premier chapitre expose, des généralités sur les ciments*

*Notamment leurs constituants ainsi que la classification*

*Les procédés de fabrication et l'hydratation du ciment portland*

*Et l'évolution de leurs propriétés.*

## **Chapitre 1**

# **GENERALITES SUR LES CIMENTS**

### **1.1. INTRODUCTION**

Le mot ciment vient du Latin (caementum), qui signifie mortier, liant des maçonneries. Ce sens d'origine a été conservé en s'appliquant aux seuls liants hydrauliques, c'est-à-dire capables de durcir au contact de l'eau [1].

Le ciment est un liant hydraulique, qui entre dans la fabrication des bétons et mortiers. Il agit comme une colle entre les grains de sable et les granulats [2]. Il est aussi au même titre que la chaux : mélangé à de l'eau (on utilise le terme de « gâcher » avec de l'eau), il durcit et prend en masse. Après durcissement, les liants hydrauliques conservent leur résistance, ainsi que leur stabilité, même exposés à l'eau [3].

Dans la préhistoire, les Grecs sont les premiers constructeurs à employer la chaux obtenue par cuisson du calcaire. Les Romains améliorent ce liant en y ajoutant des cendres volcaniques et des briques pilées et obtiennent ainsi un liant hydraulique, intermédiaire entre une chaux et un véritable ciment. Ce liant rend possible la construction de grands ouvrages tels les arènes, les thermes, les amphithéâtres ou les aqueducs, dont certains sont encore parfaitement conservés vingt siècles plus tard. C'est au 18<sup>ème</sup> siècle que sont produites les premières chaux hydrauliques proches des ciments modernes, principalement du fait des progrès réalisés dans les procédés de cuisson.

En 1759, l'Anglais John Smeaton produit un mortier aussi dur que de la pierre en mélangeant des chaux hydrauliques et des cendres volcaniques. Le Français Louis Vicat découvre en 1817 les principes chimiques des ciments et définit les règles de fabrication du ciment hydraulique. Il est considéré comme l'inventeur du ciment moderne, mais il publie ses travaux sans prendre de brevets.

C'est l'Anglais Joseph Aspdin qui fait breveter en 1824 le ciment "Portland", obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon. La dénomination "Portland", due simplement à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland (Sud de l'Angleterre), est à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie [4].

En Belgique, en 1872, Dufosse et Henry établirent la première usine de production de ciment Portland du pays à Cronfestu. Dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, le béton moderne à base de ciment Portland devient un matériau de construction largement répandu. De nombreux perfectionnements sont apportés au cours du 20<sup>ème</sup> siècle à la fabrication du ciment, notamment avec la production des ciments spéciaux, sans toutefois modifier les caractéristiques physico-chimiques et les propriétés fondamentales du ciment Portland [1].

### 1.2. CONSTITUANTS DU CIMENT

Le ciment résulte du broyage et de l'homogénéisation des composants suivants :

#### 1.2.1. Clinker portland (k)

Le clinker Portland est le constituant principal hydraulique des ciments courants, il est obtenu par calcination (1450 °C) d'un mélange de matières premières, composé d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile [4].

Le clinker se présente sous la forme de nodules durs et cristallisés, de teinte gris foncé pour les ciments habituels et verte pour le clinker de ciment blanc.

La composition des clinkers gris est représentée par quatre grandes phases cristallines caractéristiques de la chimie du ciment. Elles sont en moyenne les suivantes :

$C_3S$  : Silicate tricalcique ( $SiO_2 - 3 CaO$ ) : 50 à 65% (Alite)

$C_2S$  : Silicate bicalcique ( $SiO_2 - 2 CaO$ ) : 15 à 20% (Belite)

$C_3A$  : Aluminate tricalcique ( $Al_2O_3 - 3CaO$ ) : 5 à 15% (Aluminate)

$C_4AF$  : Ferro-aluminate tétra calcique ( $Al_2O_3 Fe_2O_3 - 4 CaO$ ) : 5 à 10% (Ferrite)

La composition minéralogique du clinker obtenu après cuisson des matières crues dépend de la composition du mélange, de la température, du combustible utilisé, du temps de cuisson et des conditions de refroidissement (trempe à l'air) [5].

#### 1.2.2. Laitier de haut fourneau (S)

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé est un sous produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker [4].

### 1.2.3. Fumée de silice (D)

La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie du silicium et des alliages de Ferro silicium. Ces produits sont fabriqués dans un four à arc, en réduisant le quartz par un apport approprié de carbone, à une température d'environ 2 000 °C. La fumée de silice est extraite en surface du four de réduction par des ventilateurs principaux et résulte de la condensation du gaz SiO, intermédiaire réactionnel du procédé de carbo-réduction.

Elle est ensuite récupérée et filtrée dans un filtre à manches, avant d'être densifiée pour en faciliter la manipulation. La fumée de silice est initialement produite sous forme de poudre grise, non-densifiée et principalement composée de particules ultrafines. Ces particules contiennent au moins 85 à 98% de silice SiO<sub>2</sub> amorphe et se présentent sous la forme de microsphères vitreuses dont le diamètre moyen se situe entre 0,1 et 0,2 µm , Leur surface spécifique varie entre 13 000 et 30000 m<sup>2</sup>/kg , et leur densité se situe entre 2,00 et 2,25 [4].

Grâce à sa très grande finesse, sa forte teneur en silice et sa structure essentiellement vitreuse, la fumée de silice constitue un produit hautement pouzzolanique, fréquemment utilisé pour la fabrication des bétons à ultra hautes performances.

### 1.2.4. Sulfate de calcium

Le gypse est une roche sédimentaire dissoute à l'origine dans l'eau de mer. Le sulfate de calcium est ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication pour retarder suffisamment la prise et assurer ainsi la mise une place convenable du mortier ou du béton [6].

Le sulfate de calcium peut se présenter sous forme de :

- Gypse (**CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O**) ou sulfate de calcium déshydraté.
- D'hémihydrate (**CaSO<sub>4</sub>.1/2H<sub>2</sub>O**).
- De l'anhydrite (**CaSO<sub>4</sub>**) ou sulfate de calcium anhydre.

Ces formes de sulfate de calcium présentent toutes la même solubilité finale quand elles se trouvent dissoutes dans l'eau, mais leur vitesse de dissolution peut être différente. Il est composé de 92 à 94% de (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), 2 à 3% de (CaCO<sub>3</sub>), et 2 à 4% d'autres éléments tels que les (SiO<sub>2</sub>, MgO, R<sub>2</sub>O). Le sulfate de calcium peut être du gypse sulfate de calcium déshydraté (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), de l'hémihydrate (CaSO<sub>4</sub>.1/2H<sub>2</sub>O), de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre (CaSO<sub>4</sub>) ou un mélange de ceux-ci.

Ces formes de sulfate de calcium présentent toutes la même solubilité finale quand elles se trouvent dissoutes dans l'eau, mais leur vitesse de dissolution peut être différente.

Le pourcentage optimal de gypse croit en fonction :

- de la teneur en alcalis, car l'addition du gypse neutralise l'action des alcalis.
- de la teneur en  $C_3A$  et de sa réactivité.
- de la finesse de mouture [7].

Au-dessus de  $1450^{\circ}C$ , se décompose en oxyde de calcium ( $CaO$ , ou "chaux vive") et en dioxyde de soufre ( $SO_2$ ) [8].

### 1.2.5. Cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que Celles – ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables.

Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment Portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires.

Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

- Les cendres silico-alumineuses (cendre de houille).
- Les cendres sulfo-calciques (cendre de lignite).
- Des cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines [9].

### 1.2.6. Fillers

Matière minérale, finement divisée destinée à remplir les vides laissés par un empilement granulaire de graviers, gravillons et sables. Le terme filler se rapporte à la petite taille des grains qui le constitue. La nature chimico-minéralogique du filler peut varier, il s'agit généralement de calcaire broyé mais les cendres volantes, la fumée de silice, ou une combinaison de ces matériaux peut être utilisée comme filler.

Selon la norme NF EN 12620 [10]. (granulats pour bétons), les fillers sont des granulats de taille inférieure à 0,063mm. Synonyme: granulats filler ou addition minérale fine. L'utilisation des fillers dans des dosages appropriés dans la formulation des bétons permet d'améliorer les propriétés d'écoulement du béton frais et les résistances mécaniques du béton durcis [11].

### 1.2.7. Schistes calcinés (T)

Schiste calciné est le terme de produit qui indique le résidu de la cuisson des schistes argileux. Ce matériau est produit dans un four spécial à une température d'environ 800°C.

En raison de la composition de la matière naturelle et le processus de production, le schiste calciné contient des étapes consistant à mâchefer, en particulier du silicate de dicalcium et de l'aluminate mon-ocalcique.

Il contient également des proportions plus élevées de pozzolaniquement oxydes réactifs, en particulier  $\text{SiO}_2$  et des pourcentages plus faibles d'autres composants tels que CaO libre et du sulfate de calcium. En conséquence, un schiste calciné broyé finement possède comme le ciment portland des propriétés hydrauliques ainsi qu'une réaction pouzzolanique [12].

### 1.2.8. Calcaire

Le calcaire est une roche sédimentaire carbonatée, composée d'au moins 50% de calcite  $\text{CaCO}_3$  (ou carbonate de calcium) et pouvant contenir de la dolomite, de l'aragonite. Les calcaires se forment soit par accumulation de fragments de squelettes ou de coquilles calcaires (coraux, bivalves, foraminifères), soit par précipitation chimique ou biochimique de carbonates de calcium.

Les roches calcaires sont classées en fonction :

- ✓ Des fossiles contenus : calcaire coquiller, calcaire à ammonites...
- ✓ De la structure de la roche : par exemple, les calcaires oolithiques sont formés de petites sphères.
- ✓ De leur grain : le calcaire lithographique utilisé en imprimerie possède un grain très fin, la craie est elle aussi un calcaire au grain très fin.
- ✓ Des impuretés présentes : les calcaires purs contiennent une proportion élevée de calcite, tandis que les calcaires siliceux contiennent plus de silice et les calcaires dolomitiques plus de dolomite, la marne est un mélange de calcaire et d'argile.
- ✓ De leur lieu de dépôt : calcaire marin, lacustre ou récifal [13].

### 1.2.9. Constituants mineurs du ciment

Les oxydes mineurs les plus importants dans le ciment sont: MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O et SO<sub>3</sub>. L'oxyde de magnésium (MgO) provient de la dolomite, souvent présente avec le calcaire. Les oxydes alcalins K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O proviennent en général, de l'argile et des feldspaths. L'anhydride sulfurique (SO<sub>3</sub>) dans le clinker provient de la pyrite (FeS<sub>2</sub>), du calcaire ou de l'argile et surtout des combustibles utilisés tels que le charbon, le fuel ou de gaz naturel [4].

## 1.3. CLASSIFICATION DU CIMENT

### 1.3.1. En fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par la norme Algérienne NA442 [14]. Et la norme NF P15-301 [15].

Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) :

- CEM I : Ciment portland (CPA-dans la notation française).
- CEM II : Ciment portland composé (CPJ).
- CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF).
- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC) [16].

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau 1.1.

**Tableau 1.1** : Types de ciments avec leurs compositions correspondantes

Ciment % en masse	Notation	K	S	D	Z	Cendres volantes		T	L	C.S
						V	W			
Portland	CPA-CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	0 – 5
Portland compose	CPJ-CEM II/A	80 – 94	6 - 20							
	CPJ-CEM II/B	65-79	21 – 35							
De haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	0 – 5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	0 – 5
	CLK-CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0 – 5
Pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	65-90	-	10 - 35		-	-	-	-	0 – 5
	CPZ-CEM IVI/B	45-64	-	36-55		-	-	-	-	0 – 5
Au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30	-	-	-	-	0 – 5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	-	31-50	-	-	-	-	0 – 5

**1.3.2. En fonction de leur résistance normale**

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes “R” sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32,5, classe 42,5, classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau 1.2. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu’elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées [16].

**Tableau 1.2 :** Valeurs des limites caractéristiques des classes de ciments.

Classe	Résistance à la compression (MPa)				Retrait à 28 jours (µm/m)	Début de prise (min)	Stabilité (mm)
	Au jeune âge		à 28 jours				
	2 Jours	7 Jours	Min	Max			
32,5	-	-	≥ 32.5	≤ 52.5	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32,5R	≥ 13,5	-					
42,5	≥ 12.5	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≤ 1000	≥ 60	
42,5R	≥ 20	-					
52,5	≥ 20	-	≥ 52.5	-	-		
52,5R	≥ 30	-					

**1.3.3. Ciment adaptés à des usages spécifiques**

Il existe des ciments dont les références ne sont pas normalisées au niveau Européen. Ils sont cependant, répertoriés dans la norme NF P 15-301[15] ; ils sont cités ci- dessous avec leur symbolisation normalisée et le numéro de la norme qui les décrit

**a) ciment alumineux fondu CA (NF P 15-315) [17]**

Il est obtenu en remplaçant l'argile par de la bauxite et en portant la cuisson jusqu'à la fusion ; l'alumine représente au moins 30 % de sa masse. Le ciment réfractaire, à prise lente mais à durcissement rapide, résistant aux milieux agressifs. Ses utilisations sont nombreuses : bétons réfractaires, sols soumis à des chocs, à un fort trafic ou à la corrosion, canalisations, ouvrages d'assainissement, réparations, scellements [18]

**b) Ciment prompt naturel CNP (NF P 15-314) [19]**

Ce ciment est particulièrement fin et moulable. Techniquement, c'est un ciment obtenu par une cuisson 1 000 à 1 200 °C de calcaires contenant de 23 à 30% d'argile et dont la prise

s'effectue en dix ou vingt minutes [20]. Une résistance mécanique élevée à très court terme mais dont la progression est ensuite limitée, et un retrait faible utilisé pour les scellements, les réparations, les bétons projetés [21].

### **c) Ciments a maçonner CM (NF P15-307) [22]**

Ciment amaigri ne comportant pas plus de 50 % de fines inertes ; utilisé pour les mortiers de maçonnerie courante [23].

Ce ciment contient, en proportions moindres, les mêmes éléments actifs que le ciment portland artificiel ; ses propriétés et son comportement dans les milieux courants sont analogues à ceux du ciment portland, mais ses résistances sont moins élevées [24].

### **d) Ciments Naturels CN**

Le ciment naturel à prise rapide, également appelé improprement "ciment romain" à ses débuts, est le premier ciment au sens moderne du terme. Il a constitué en son temps une révolution technologique. Il était à la source de nombreuses constructions au XIXe siècle. Ces ciments étaient appréciés pour 4 raisons principales : leur rapidité de prise, la résistance des mortiers, leur esthétique et la durabilité des ouvrages [25].

Et il est obtenu à partir d'un calcaire marneux ayant naturellement les proportions d'argile et de calcaire nécessaires. Le manque de régularité des caractéristiques de ce produit en limite l'intérêt ; reste essentiellement utilisé pour la fabrication de ciment prompt [26].

### **e) Ciment de laitier à la chaux**

Ciment obtenu a partir de chaux hydraulique (environ 30 %) et de laitier granulé de haut fourneau (70%) [27].

## **1.4. PROCEDE DE FABRICATION DU CIMENT PORTLAND**

Toute l'histoire de la fabrication du ciment, commence à la carrière. Pour fabriquer du ciment, il faut réunir quatre éléments principaux selon des dosages préétablis : la chaux (65%), la silice (20%), l'alumine (10%), l'oxyde de fer (5%). L'élément prépondérant étant le calcaire, La cimenterie est d'ailleurs implanté à proximité d'un important gisement de cette matière [28].

### **1.4.1. Extraction et concassage**

Le calcaire et l'argile sont extraits de carrières situées à proximité des cimenteries. Abattus à l'explosif, les rochers et blocs sont transportés par des tombereaux (gros camions) vers des

concasseurs afin de réduire leur taille et d'obtenir des cailloux de moins de 10 cm de diamètre. Ces matières premières font l'objet d'une sélection rigoureuse. Leur composition doit comprendre de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer dans des proportions bien déterminées. [29].

### 1.4.2. Préparation des matières premières

Pour favoriser les réactions chimiques qui suivent, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques microns) afin de réduire la roche en une poudre très fine, de taille micrométrique dans des broyeurs à boulets ou dans des broyeurs à meules verticaux. Ces derniers, plus récents, sont plus économiques en énergie et permettent un séchage plus efficace. Après avoir été finement broyée, la farine crue est très largement brassée dans des silos d'homogénéisation [30].

Pour ce la il ya 4 voies :

#### a) Trompe par voie humide (la plus ancienne)

Les matériaux sont délayés avec de l'eau de façon à obtenir une pâte fluide (28 à 35% d'eau) ayant une composition chimique convenable et qui sert à alimenter des fours rotatifs. Un four moyen de 150 mètres de longueur, 4 mètres de diamètre permet une production de 1000 tonnes/jours. Les plus grands en service ont des diamètres de 6 à 7 mètres, des longueurs de 230 mètres et peuvent produire près de 4000 tonnes de clinker par jour. Le clinker est refroidi vers 100°C dans des appareils spéciaux et stocké dans des halls.

C'est le procédé la plus ancienne main il n'est pas économique car il consomme énormément d'énergie (de l'ordre de 1250 à 1400 kcal par kg de clinker produit). Ce procédé tend pratiquement à disparaître actuellement [31].

Ce procédé ancien est, d'une façon générale, remplacé par la voie sèche. Le remplacement est réalisé dans les pays industrialisés depuis vingt à trente ans sauf exception. Ce procédé est en effet parfois encore utilisé, dans les pays industrialisés, pour incinérer des déchets industriels et agricoles [32]. .

#### b) Trompe par voie semi-humide (en partant de la voie humide)

C'est une variante du procédé par voie humide, la pâte est essorée par des filtres presses, boudinée, décarbonatée, avant d'être cuite dans les fours rotatifs courts [31].

Ces technologies, utilisées Ilya une trentaine d'années, présentaient l'avantage d'une consommation calorifique plus faible que la voie humide [32].

### **c) Trompe par voie sèche (la plus utilisée)**

Les roches sont concassées, échantillonnées, déversées dans, des halls de pré-homogénéisation de façon à reconstituer une carrière artificielle. Elles sont reprises afin d'être transformées en poudre sèche dans des broyeurs sécheurs puis parfaitement homogénéisées par le procédé de fluidification. La poudre obtenue passe ensuite dans des fours le plus souvent constitués de deux parties : une partie verticale (préchauffer) où elle se décarbonate et arrive ainsi vers 1000° dans un four rotatif court (60 à 80 mètres de longueur). Un four de 4 mètres de diamètre et 70 mètres de longueur a une production de 2500 tonnes/jours. Il existe des fours capables de produire jusqu'à 8000 tonnes de clinker par jour [31].

Les fours à préchauffeurs avec ou sans précalcinateurs sont les seuls procédés actuellement installés [32].

### **d) Trompe par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche)**

Il constitue une variante de la voie sèche. La poudre est agglomérée avec de l'eau pour former des granulats qui passent d'abord sur une grille de décarnisation. On peut, avec ce procédé, utiliser des fours droits. Ce procédé est économique et consomme de l'ordre de 800 à 900 kcal/kg de clinker : soit environ 40% de moins que le procédé par humide [31].

### **1.4.3. Cuisson de cru**

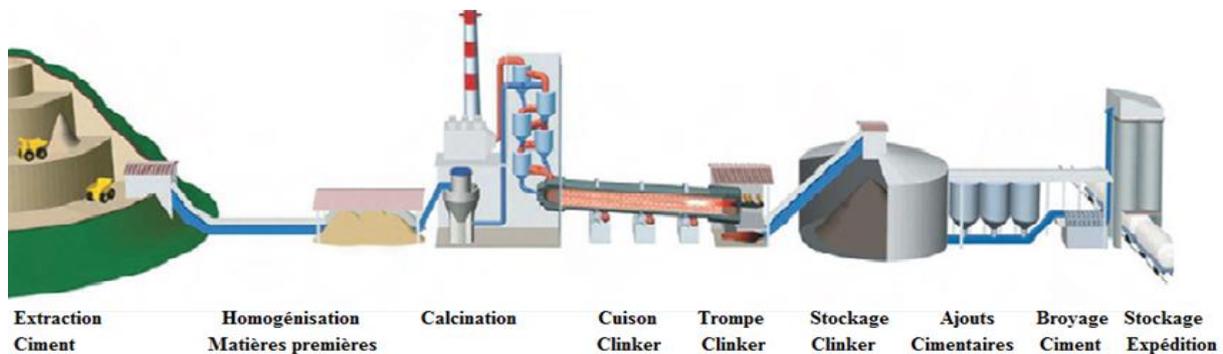
La farine, précédemment préchauffée à 850°C est ensuite chauffée à 1450°C sous une flamme à 2000°C dans un four rotatif garni de brique réfractaires, long cylindre tournant de 1,5 à 3 tour/minute et légèrement incliné qui fonction 24heur/24heur et 7jour/7jour [33]. La matière chemine lentement et se préchauffe le cru à environ 800°C. A la sortie du four, un refroidisseur à grille permet d'assurer la trempe des nodules incandescents et de les ramener à une température d'environ 100°C. Tout au long de la cuisson, un ensemble de réactions physico-chimiques conduit à l'obtention du clinker la décarbonatation du carbonate de calcium (calcaire) donne de gypse la marne se scinde en sa constituante silice et alumine qui se combinent à la chaux pour former des silicates et aluminates de chaux. Ce phénomène progressif constitue la clinkérisation [30].

### 1.4.4. Broyage du clinker et élaboration de ciment

Le mélange en fusion est trempé (c'est-à-dire refroidi rapidement) par soufflage d'air, afin d'obtenir la chimie cristalline appropriée pour les propriétés. Le clinker refroidi à 100°C est transporté et stocké dans un hall de plusieurs dizaines de milliers de tonnes [34].

Le clinker doit être à son tour broyé très finement. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets. Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier qui, par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grains supérieurs à 80 microns. A la sortie du broyeur, un cyclone sépare les éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée du broyeur, C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (3 à 5%) indispensable à la régulation de prise du ciment.

On obtient alors le ciment. Les ciments avec "ajouts" sont obtenus par l'addition au clinker, lors de son broyage, d'éléments minéraux supplémentaires contenus par exemple dans les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de centrales thermiques, les fillers calcaires, les pouzzolanes naturelles. Ainsi sont obtenues les différentes catégories de ciments qui permettront la réalisation d'ouvrage allant du plus courant au plus exigeant [30].



**Figure 1.1** : procédé de fabrication du ciment [35].

### 1.5. HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND

La plupart des propriétés du béton, et plusieurs aspects de sa durabilité dépendent des caractéristiques de la pâte de ciment durci. Il est donc important de comprendre la structure de la pâte de ciment hydraté La prise du ciment n'est pas un séchage de la pâte après ajout de l'eau ; il s'agit d'un ensemble de réactions chimiques d'hydratation permettant le passage de

la pâte de ciment (ciment additionné d'eau) de l'état liquide à l'état solide. L'hydratation du ciment met en jeu un nombre important de réactions chimiques complexes. Toutes ces réactions conduisent à la formation de silicates ou d'aluminates calciques hydratés qui font prise et qui donnent les propriétés mécaniques des pâtes de ciment (ciment + eau), des mortiers (ciment + eau + sable) et des bétons (ciment + eau + fins et gros granulats) [36].

### 1.5.1. Hydratation des phases du ciment

La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ , et  $C_4AF$  réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau.

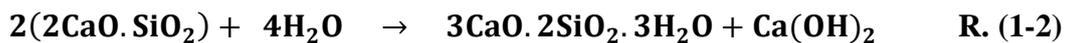
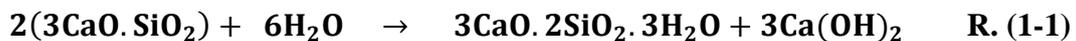
Les quatre phases du ciment peuvent être divisées en deux familles: les aluminates ( $C_3A$  et  $C_4AF$ ) et les silicates ( $C_3S$  et  $C_2S$ ). Dans une même famille, l'hydratation des constituants conduit à des produits identiques. Seules les cinétiques des réactions diffèrent.

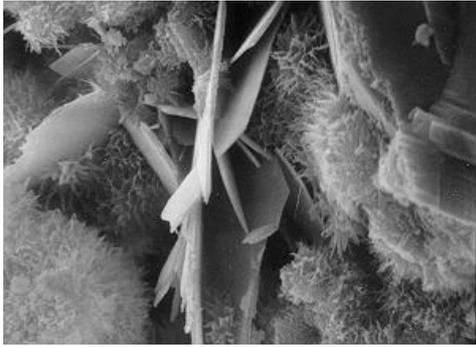
Ce sont ces différentes cinétiques qui sont à l'origine de l'évolution des propriétés mécaniques d'une pâte de ciment à l'échelle macroscopique. Elles permettent le maintien de la maniabilité, la prise puis le durcissement de cette pâte.

#### 1.5.1.1. Hydratation des silicates $C_3S$ et $C_2S$

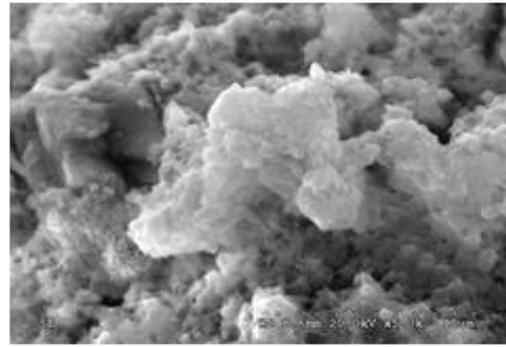
Les silicates  $C_3S$  et  $C_2S$  sont les phases majoritaires du ciment. L'alite est formée lorsque la bélite réagit avec la chaux à une température variant entre 1400 et 1500°C.

Lors de l'hydratation du ciment, la réaction chimique des deux silicates avec l'eau produit un gel de silice hydraté : l'hydroxyde de calcium C-S-H (Tobermorite) et portlandite  $Ca(OH)_2$  notée (CH) selon les réactions suivantes [37].

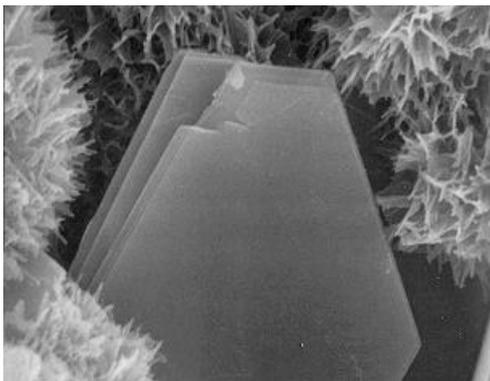




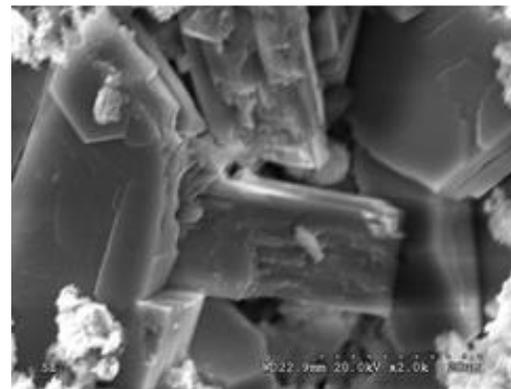
**Figure 1.2 :** C-S-H en fibre [38].



**Figure 1.3 :** gel de C-S-H [39].



**Figure 1.4 :** Ca(OH)<sub>2</sub> et CSH [38].



**Figure 1.5 :** cristaux de portlandite [39].

La majeure partie de l'hydratation du C<sub>3</sub>S se passe dans les vingt-huit premiers jours suivant le contact avec l'eau. Elle participe à la prise initiale et contribue aux résistances initiale et finale de la pâte. La réaction complète peut prendre jusqu'à une année voir plus [39].

L'hydratation du C<sub>2</sub>S est beaucoup plus lente que celle du C<sub>3</sub>S. Il participe aux résistances au-delà d'une semaine après le contact avec l'eau. La quantité de portlandite produite est plus faible d'un tiers que dans le cas du C<sub>3</sub>S.

La portlandite est un composé défini et cristallisé (figure 1-4). Elle cristallise sous la forme de plaquettes hexagonales constituées d'un motif hexagonal en couche. Elle est précipitée à partir de la solution et représente 5 à 15% du ciment hydraté [39].

D'après Wild et al 1996 [40]. le pourcentage de la portlandite est de 28% du poids du ciment complètement hydraté, et comme les réactions ne sont jamais achevées, les mêmes auteurs estiment que la quantité de la portlandite est entre 16 et 20% de la masse du ciment. Au cours de l'hydratation, elle est enrobée par les autres hydrates, c'est pourquoi sa croissance développe des contraintes internes qui pénalisent la résistance mécanique du matériau.

Le C-S-H est le composé majoritaire du ciment hydraté, il représente 50 à 70% de sa masse [39]. Il est non stoechiométrique, mal cristallisé et de structure intermédiaire entre les cristaux

et les gels (figures 1.2 et 1.4). Plus de trente phases cristallines de cet hydrate sont connues. Elles sont toutes nommées sous le terme générique de C-S-H. Les tirets dans l'appellation traduisent un caractère non défini. Les (C -S - H) sont des composés non cristallins. Ils ont les caractéristiques d'un gel et possèdent une composition variable, leur formule générale est la

Suivante :

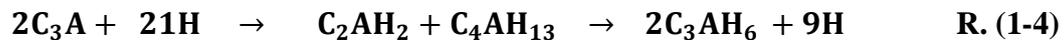
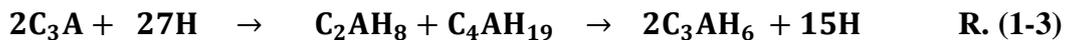
$$(CaO)_x(SiO_4)_y(H_2O)_z.$$

Avec :  $0.6 < \frac{x}{y} < 2$  et  $1 < z < 4$ .

Leur composition moyenne est proche de  $(CaO)_{1.7}(SiO_4)(H_2O)_4$ .

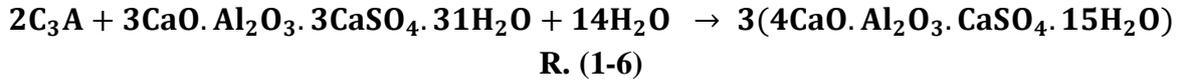
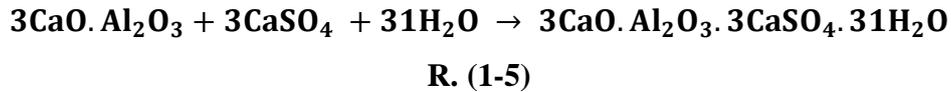
### 1.5.1.2 Hydratation de la phase aluminates

La phase aluminates composée de  $C_3A$  et  $C_4AF$  forme également des hydrates, mais elle ne contribue que peu à la résistance de la pâte du ciment, elle est le responsable du phénomène dit de «prise éclair». L'hydratation du  $C_3A$ ; qui conduit à la formation d'hydroaluminates métastables qui disparaissent au profit de l'hydrogénéat  $C_3AH_6$ . Elle peut être représentée par les équations suivantes:



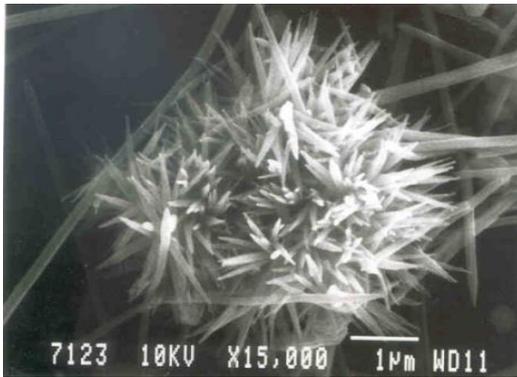
Pour éviter ce phénomène (dite prise éclair), la réaction d'hydratation de  $C_3A$  et  $C_4AF$  doit être contrôlée avec du gypse. Le  $C_3A$  et le gypse se dissolvent les premiers lors de l'hydratation du ciment. L'hydratation de  $C_3A$  conduit à la formation de trisulfoaluminate de calcium hydraté ou Ettringite ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ ) (figure 1.6). Le  $C_3A$  s'enrobe ensuite d'une couche protectrice d'Ettringite très finement cristallisée. Cette couche se dissout ensuite pour recristalliser sous la forme d'aiguilles prismatiques [39]. L'ettringite n'est un produit hydraté stable que lorsque le gypse est en quantité suffisante. Or, dans la majorité des cas, le  $C_3A$  est en excès par rapport au gypse. C'est pourquoi, quand le gypse est consommé et que le  $C_3A$  n'est pas complètement hydraté, l'Ettringite se transforme en Monosulfoaluminate tétracalcique hydraté (figure 1.7). Le Monosulfoaluminate cristallise sous la forme de plaquettes hexagonales. Sa structure est constituée d'une double couche d'hydroxyde avec une couche d'hydroxyde de calcium dans laquelle le tiers des ions calcium est remplacé par des ions  $Al^{+3}$  ou  $Fe^{+3}$  et des contre-ions sulfates entourés de molécules d'eau dans l'espace interfeuillet. L'ettringite et les Monosulfates représentent 20 à 30% du ciment hydraté. La vitesse de recristallisation de l'ettringite est très faible. Cette particularité joue un rôle très

important dans l'hydratation du ciment puisqu'elle permet de garder la maniabilité de la pâte dans les premières heures [39]. Les réactions d'hydratation sont comme suit :

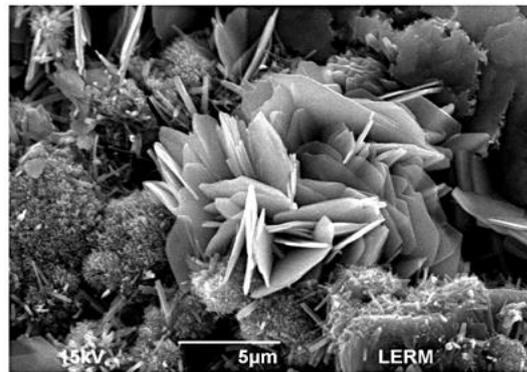


De plus, si après la formation du Monosulfoaluminate tétracalcique il reste du  $\text{C}_3\text{A}$ , il se forme des composés de moins en moins riches en sulfate.

La phase ferrique  $\text{C}_4\text{AF}$  adopte le même mécanisme d'hydratation que la phase  $\text{C}_3\text{A}$ , les réactions sont cependant plus lentes, en présence d'eau et du gypse. L'hydratation de  $\text{C}_4\text{AF}$  est plus efficacement retardée que celle du  $\text{C}_3\text{A}$ .



**Figure 1.6 :** aiguilles d'ettringite [38].



**Figure 1.7 :** monosulfoaluminate hydraté [40].

### 1.5.2. L'aspect cinétique

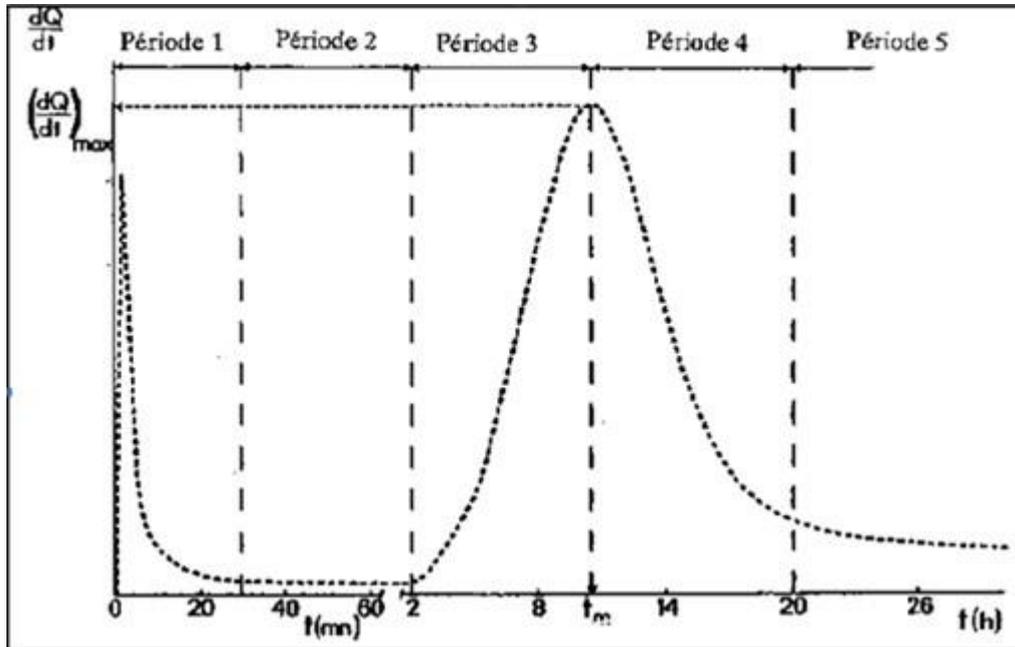
La cinétique particulière de l'hydratation de  $\text{C}_3\text{S}$  telle qu'elle est généralement étudiée, c'est à dire dans les conditions pour lesquelles la prise hydraulique est observée (les conditions d'utilisation du ciment Portland) soit un rapport pondéral liquide sur solide (que l'on notera  $l/s$ ) inférieur ou égal à 0,5, est bien mise en évidence par calorimétrie isotherme.

La variation du flux thermique enregistrée lors de l'hydratation du silicate

Tricalcique en pâte (ou du ciment Portland) est généralement décrite dans la bibliographie à l'aide de la nomenclature suivante figure 1.8 :

- 1- la période initiale qui concerne les premières minutes de la réaction, elle correspond au premier pic exothermique.
- 2- la période d'induction ou période dormante, de 2 à 6 heures selon la réactivité du  $\text{C}_3\text{S}$ , elle correspond à un très faible dégagement de chaleur traduisant une faible activité chimique.

- 3- la période d'accélération, correspondant à la partie ascendante du second pic exothermique.
- 4- la période de décélération, associée à la partie descendante du second pic exothermique.
- 5- la période finale, période de faible activité thermique pouvant s'étendre sur un an ou plus.

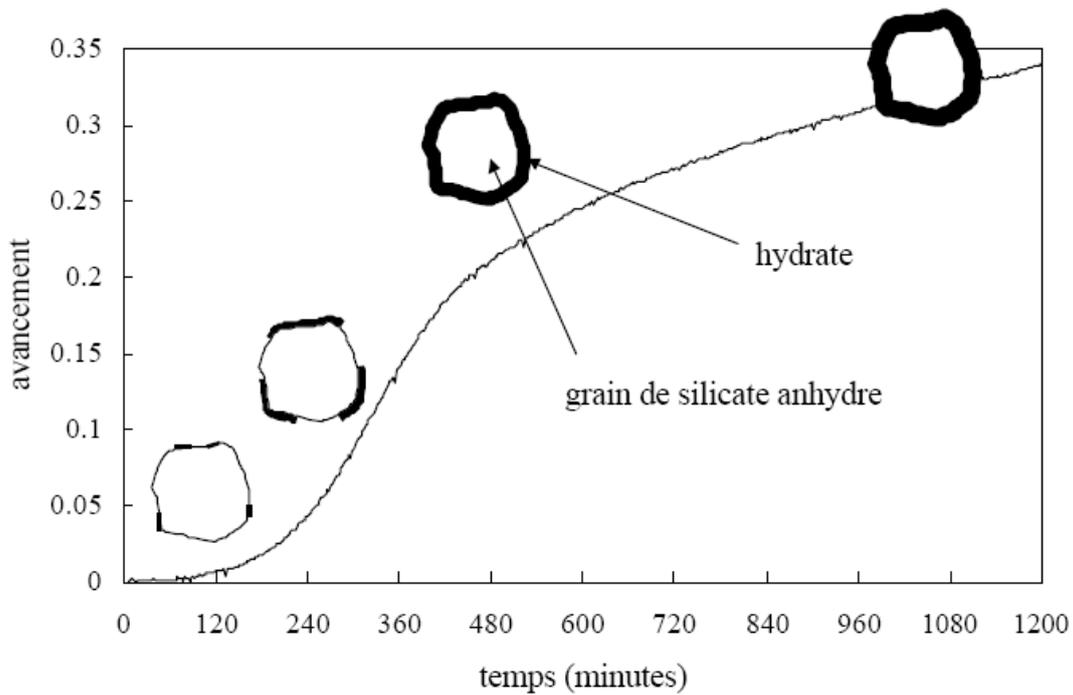


**Figures 1.8 :** Les différentes périodes de la courbe calorimétrique lors de l'hydratation des silicates tricalciques C<sub>3</sub>S en pâte.

Sans cette cinétique particulière, l'utilisation du ciment portland n'aurait pas connu le développement qu'elle a eu dans les bétons. C'est en effet l'existence de la période dormante, pendant laquelle le béton reste ouvrable, qui permet le transport et la mise en place du béton. La prise du ciment coïncide avec la fin de la période d'accélération; une accélération rapide permet donc de procéder plus vite au décoffrage.

On conçoit qu'industriellement, la possibilité de raccourcir ou d'allonger la période d'induction est très importante et c'est l'un des rôles essentiels de l'adjuvantage. Cependant, pour maîtriser l'utilisation des adjuvants qui repose le plus souvent sur des observations empiriques, il est primordial de bien connaître les mécanismes de la ou des réactions sur lesquelles on veut agir; c'est la raison pour laquelle de nombreuses études et hypothèses ont été faites pour expliquer l'origine de la période d'induction.

En ce qui concerne le ralentissement final de la réaction la plupart des auteurs l'expliquent par le recouvrement complet de la surface des silicates de calcium par la couche de C-S-H couche d'hydrate. L'hydratation complète, alors régie par la diffusion, peut nécessiter une année.



**Figure 1.9 :** Courbe d'avancement d'une hydratation de C<sub>3</sub>S.

On observe une partie initiale où l'avancement reste faible qui serait liée au nombre de germes initiaux de C-S-H précipitant à la surface du grain. La période accélérée est relative à la croissance libre des C-S-H sur la surface du grain de C<sub>3</sub>S.

Le recouvrement complet du grain anhydre entraîne le ralentissement de la réaction qui est alors limitée par la diffusion des réactifs à travers la couche continue d'hydrate.

### 1.6. EVOLUTION DES PROPRIETES DU CIMENT PORTLAND

L'évolution des propriétés des liants hydrauliques résultent de la superposition de trois types de phénomènes; un phénomène chimique (l'hydratation), un phénomène physique (la précipitation des solides) et un phénomène mécanique (la prise et le durcissement) [7].

### Références bibliographiques du premier chapitre

- [1]. <https://www.febelcem.be/fr/ciment-applications/historique-du-ciment/>.
- [2]. <https://www.lafarge.fr/histoire-du-ciment>.
- [3]. <https://www.lafarge.fr/fabricationduciment?fbclid=IwAR28JCnC8QYjqpCNPSAIoys2wI48NvDwzp k8l7EknnWRJxfnRkNiI0exY>.
- [4]. Nigri G. Etude de l'influence des ajouts minéraux sur la qualité et les propriétés du ciment, Mémoire de Magister, Université 08 Mai 45, Guelma, Algérie, 2005.
- [5]. <http://www.ciment.wikibis.com/clinker.php?fbclid=IwAR3JLL2INKhH4xtxECDhlZ4tHYJlpoZDyGJsyLq9kvnXYjPZ0eZhFKLay0>.
- [6]. Pierre Claude A. Bétons Haute Performance, Édition Eyrolles 2001.
- [7]. Nigri G. Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique, Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie 2018.
- [8]. <http://pravarini.free.fr/CaSO4.htm>.
- [9]. Nara Y et Guenchouba D. Etude de l'effet de la finesse de la poudre de verre sur les caractéristiques physique et mécanique des mortiers, Master académique, Université Ziane Achour, Djelfa, Algérie 2017.
- [10]. NF EN (12620) Critères de qualité pour les granulats à béton.
- [11]. <https://www.infociments.fr/glossaire/filler>.
- [12]. <http://boowiki.info/art/materiaux-de-construction/schiste-argileux-calcine.html>.
- [13]. <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-calcaire-1422/>.
- [14]. Norme Algérienne NA442. Liants hydrauliques-ciments courants : Composition spécifications et critères de conformité, 2<sup>ème</sup> Edition, Edition Ianor, Algérie, 2000.
- [15]. Norme Française NF-P 15-301. Liants hydrauliques, ciments courants, composition spécification et critères de conformité, juin, 1994.
- [16]. <https://forumbtp.blogspot.com/2014/04/lesciments.html?fbclid=IwAR0kUHo4AMnvjdH5DH8Z4w2yNjWBHeCqHxBCF1HEUiv0AUNMxGzIJSCLCyw>.
- [17]. NF P 15 317 de September 1995 – Liants hydrauliques – Ciments pour travaux à la mer.
- [18]. <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=2199>.
- [19]. NF P 15-314 de février 1993 – Liants hydrauliques – Ciment prompt naturel.
- [20]. [https://www.encyclopedie.fr/definition/Ciment\\_naturel\\_prompt](https://www.encyclopedie.fr/definition/Ciment_naturel_prompt).
- [21]. <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=2227>.

- [22]. NF P 15-307 de décembre 2000 – Liants hydrauliques – Ciments à maçonner – Composition, spécifications et critères de conformité.
- [23]. <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=2215>.
- [24]. <https://www.legabion.net/wp-content/uploads/2019/07/Cours-sur-les-liants-en-ma%C3%A7onnerie.pdf>.
- [25]. <http://www.cimentetarchitecture.com/fr/Ciment-naturel-Prompt/L-historique/Ciment-naturel-ou-Ciment-romain>.
- [26]. <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=2218>.
- [27]. <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=2211>.
- [28]. <https://www.febelcem.be/fr/ciment-applications/fabrication-du-ciment/>.
- [29]. <http://www.schb.dz/processus-de-fabrication-du-ciment/>.
- [30]. Mellouk.Med.A et Aouali Med A. Le broyeur, Master 2, Université Saad dahlab1, Blida, Algérie.
- [31]. Fatouhi.A., Le ciment et les ajouts cimentaire, Master 2, Université Ziane Achour, Djelfa, Algérie 2011.
- [32]. Le diagnostic énergétique d'une cimenterie, Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, IEPF.
- [33]. <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process/la-cuisson>.
- [34]. <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process>.
- [35]. Fiche technique. Association Canadienne de ciment, ciment et béton, Mai, 2010.
- [36]. Goto T. Influence des paramètres moléculaires du latex sur l'hydratation la rhéologie et les propriétés mécaniques des composites ciment/latex, Thèse de doctorat, Université paris vi-pierre et marie curie, Paris vi, France, 2006.
- [37]. Pierre Claude A. Bétons Haute Performance, Édition Eyrolles, 2001.
- [38]. Defosse C. Chimie du ciment, Valorisation des déchets en cimenterie, Université libre de Bruxelles, 2004, site "CHIM 315 Partie 32004.
- [39]. Delair S. Etude de l'atténuation des efflorescences sur les matériaux cimentaires au moyen des produits pouzzolaniques, Thèse de doctorat, Ecole supérieure de Saint-Étienne, France, 2008.
- [40]. Wild S et Khatib JM., Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars, Cement and concrete research 1996.

# CHAPITRE 2 :

## Généralités sur les déchets

*Ce deuxième chapitre expose, des généralités sur les déchets*

*Notamment leurs classifications*

*Ainsi que sa gestion*

*Leur traitement.*

## Chapitre 2

# GENERALITES SUR LES DECHETS

### 2.1. INTRODUCTION

La croissance régulière de la population et le changement des modes de production et de consommation entraînent de nos jours l'utilisation intensive et abusive des ressources et le rejet des déchets dans l'environnement. Ces derniers contribuent à détériorer notre milieu. Ce changement a un impact sur la société, la santé humaine, l'économie, les espèces vivantes, la production alimentaire, le tourisme et l'écologie [1].

### 2.2. DEFINITION DES DECHETS

La définition intuitive est généralement donnée par rapport à l'usage d'un produit, d'un matériau dont on ne sait plus quoi faire, et dont il faut se débarrasser. La notion de déchets est donc liée à la durée de vie d'un produit, et ce produit dont l'usage est terminé, peut être lui-même recyclé ou transformé en sous produits réutilisables.

Une autre approche du déchet est sa classification :

- ✓ **Par catégories physiques** : déchets liquides et solides, radioactifs ou non, déchets ferreux, chimiques, organiques. Une grande partie de nos déchets liquides n'entre pas dans la catégorie des déchets, ce sont les eaux usées urbaines et industrielles qui participent au cycle de l'eau : par exemple, une eau d'égout est considérée comme un rejet aqueux dans le milieu naturel, elle peut être épurée (valorisation) et le terme de déchet ne réapparaît que lorsque l'on a piégé un déchet solide, les boues de stations d'épuration.
- ✓ **Par producteur de déchet** : le déchet peut être issu de l'activité d'une famille, c'est alors une ordure ménagère, par l'activité d'un industriel, déchet industriel ou par l'activité des hôpitaux, médecins, infirmiers.

Deux définitions complémentaires apparaissent :

**Le recyclage** : on parle plutôt aujourd'hui de valorisation des déchets, avec une valorisation dite « matière » lorsque tout ou partie du produit est récupéré et fait l'objet d'un nouvel usage et une valorisation « énergétique » lorsque le déchet produit de l'énergie (chaleur, électricité).

**Le déchet ultime** : c'est le stade où « dans les conditions techniques et économiques du moment » on ne trouve plus d'usage au déchet; il faut donc le détruire, le stocker ou l'exporter.

Les résidus peuvent être éliminés lorsqu'ils sont destinés à l'enfouissement dans les décharges ou à être enterrés ou recyclés obtenant ainsi un nouvel usage.

### 2.3. CLASSIFICATION DES DECHETS

Les déchets sont généralement classés en fonction de leur provenance et de leur dangerosité. Le critère de dangerosité l'a emporté dans la nouvelle classification Européenne des déchets, bien qu'il soit largement superposable au critère de provenance, à quelques exceptions près [2]. Il existe une autre classification selon la quelle les déchets sont regroupés en trois grandes catégories : Les déchets agricoles, les déchets ménagers et assimilés et les déchets industriels [3].

#### 2.3.1. Déchets solides dangereux

Les déchets dangereux regroupent par ordre d'importance décroissante les déchets industriels spéciaux, les déchets dangereux du secteur du bâtiment et des travaux publics, les déchets dangereux des ménages, et les déchets d'activités de soin à risque infectieux.

Comme nous le verrons plus loin, les déchets industriels spéciaux constituent la grande majorité des déchets dangereux et ces déchets font l'objet d'une filière lourde dédiée. Les principaux modes de traitement et d'élimination des déchets dangereux sont l'incinération et le stockage en installations de stockage de déchets dangereux après stabilisation anciennement dites installations de classe 1 [1].

##### a- Déchets ménagers dangereux

Cela comprend les produits ménagers usagés et les restes contenant des composants corrosifs, toxiques, inflammables ou réactifs. Ont surtout composés par les piles, ampoules, solvants, peinture, vernis, colles, batteries, cartouches de toner pour imprimantes, tubes fluorescents, produits de nettoyage, aérosols, produits phytosanitaires.

##### b- Déchets industriels dangereux

Ce sont les déchets qui présentent un risque particulier car ils sont toxiques, inflammables, explosifs, corrosifs, etc. D'une façon générale ils sont dommageables pour l'homme et l'environnement [1]. Les déchets toxiques en quantité dispersée sont les mêmes que les

déchets ci-dessus mais ils sont détenus par des industries. On ajoute alors à la liste précédente les produits contenant des micros polluants organiques et métalliques. Ils possèdent avec les déchets ménagers spéciaux un potentiel de risque car ils sont hétéroclites, sources de dangers disparates et font l'objet de politiques spécifiques de tri sélectif, de processus spécifiques de collectes et de traitements [2]. Les principaux générateurs de déchets dangereux dans toute région sont les installations industrielles, les unités de fabrication et de traitement, les ateliers et les unités de maintenance, les installations nucléaires, les unités chimiques.

### **c- Déchets universels**

Les déchets dangereux désignés tels que les batteries, les pesticides, le matériel contenant du mercure et les ampoules : lampes comme déchets universels. C'est un moyen de les rationaliser séparément et de contrôler et de faciliter la collecte, le stockage, la récupération ou le traitement appropriés.

### **d- Déchets mélangés**

Il s'agit de déchets qui contiennent à la fois des déchets radioactifs et des déchets dangereux, ce qui les rend complexes à réguler. Les déchets mixtes à faible niveau proviennent de sources telles que les usines industrielles, les hôpitaux et les centrales nucléaires, ainsi que de procédés tels que les tests et la recherche en diagnostic médical, le développement pharmaceutique et biotechnologique, la recherche sur les pesticides.

### **e- Déchets caractéristiques**

Les déchets qui définissent en fonction de leurs caractéristiques spécifiques d'inflammabilité, et Les déchets corrosifs comme les acides de batterie sont caractérisé. Les déchets réactifs comprennent des batteries au lithium-soufre et des explosifs qui peuvent provoquer des explosions, Les exemples de déchets toxiques comprennent le mercure et le plomb.

### **2.3.2. Déchets solides non dangereux**

Les déchets non dangereux recourent, par opposition aux déchets dangereux, les déchets non toxiques qui proviennent de l'ensemble des activités économiques et des ménages. L'appellation « déchets non dangereux » fait suite à l'appellation « déchets ménagers et assimilés » Cette catégorie de déchets recouvre les ordures ménagères, les déchets des collectivités, les encombrants, ainsi que les déchets industriels banals. A noter que les déchets collectés par les collectivités sont généralement regroupés sous le terme déchets municipaux. Les déchets non dangereux présentent l'intérêt d'être en grande partie valorisables sous forme

de matière ou d'énergie, ils peuvent être recyclés, compostés, incinérés en unité d'incinération des ordures ménagères ou traités en installations de stockage de déchets non dangereux anciennement dites installations de classe 2 [2].

### **a- Déchets solides municipaux**

Comprend tous les objets quotidiens jetés des ménages, des entités commerciales et institutionnelles, l'horticulture et le balayage des routes. Cela comprend des articles tels que l'emballage, le papier, le carton, les déchets alimentaires, les sacs en plastique et les conteneurs, les bouteilles en verre, les coupures de gazon, les meubles, les pneus, les articles électriques et électroniques et les métaux.

### **b- Déchets agricoles et animaux**

Les déchets agricoles comprennent les résidus de cultures primaires qui restent dans les champs après la récolte et les résidus de transformation secondaires provenant des récoltes des cultures pendant la production des aliments, des aliments pour animaux et des fibres. Cela est généré au cours de la production et de la distribution par décomposition de denrées alimentaires, de légumes ou de viande, d'enlèvement de pièces non utilisables.

### **c- Déchets industriels**

Comprend les déchets industriels de produits chimiques organiques, de produits chimiques inorganiques, de fer et d'acier, de matières plastiques et de résines, de pierre, d'argile, de verre, de béton, de pâtes et papiers, d'aliments et de produits apparentés [4]. Les déchets industriels ne pénètrent pas dans le flux de déchets solides municipaux et sont donc mis en décharge ou traités séparément.

#### **c.1- Déchets de construction et de démolition**

Les déchets comprennent les débris générés pendant la construction, la rénovation et la démolition de bâtiments, de routes et de ponts. Il peut s'agir de matériaux de construction encombrants et lourds composés de béton, de déchets de bois de construction, d'asphalte de routes et de bardeaux de toit, de gypse de plâtre, de métaux, de briques, de blocs, de verre, de matières plastiques, Souches, terre [4].

#### **c.2- Déchets médicaux**

Les déchets biomédicaux se composent de tous les déchets produits dans les établissements de santé, y compris les hôpitaux, les cliniques, les cabinets de médecins, les dentistes et les

vétérinaires, les banques de sang, les établissements de soins à domicile, les salons funéraires, les installations de recherche médicale et les laboratoires [4].

### **c.3- Déchets inertes**

Les déchets inertes sont les déchets les plus stables. En cas de stockage en décharge, ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante et ne présentent pas de danger pour l'homme et l'environnement comme: les Bétons, briques, parpaings, tuiles et céramiques, terres et granulats non pollués et sans mélange.

### **c.4- Déchets banals**

Les déchets banals ou les déchets industriels banals sont non inertes et non dangereux générés par les activités, publiques ou privées, du commerce, de l'artisanat, de l'industrie ou du service. Ce sont des déchets qui ne présentent pas de danger particulier vis-à-vis des personnes ou de l'environnement et qui peuvent être éliminés dans les mêmes conditions que les ordures ménagères. Il s'agit notamment des cartons, des papiers, des plastiques, de plâtre, de verre, de bois d'ouvrage, des métaux.

### **2.3.3. Déchets inertes**

Les déchets inertes sont essentiellement des déchets provenant des secteurs du bâtiment et des travaux publics et agricoles. Ils sont produits en quantités importantes, mais ils sont généralement valorisables, et leur non-dangerosité fait qu'ils sont souvent réutilisés directement in situ et qu'ils n'entrent pas dans le cadre du traitement industriel des déchets. Toutefois, une part d'entre eux peut être valorisée en l'état après transport, stockée en installation de stockage de déchets inertes voire incinérée, anciennement dites installations de classe 3 [2].

(Figure 2.1) regroupe la classification des déchets et le (tableau 2.1) donne un exemple de chaque classe :

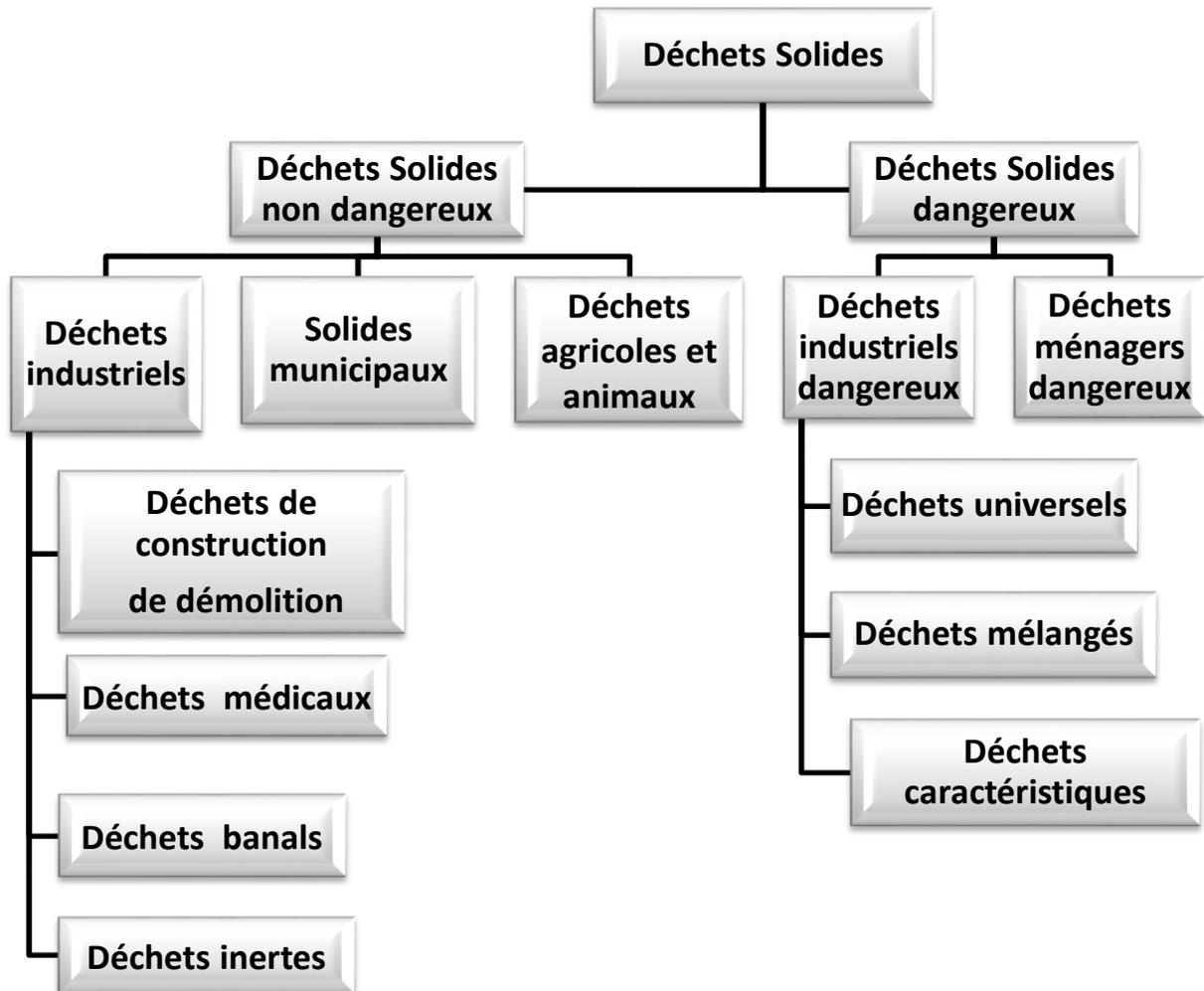


Figure 2.1. Les Types déchets solides

## CHAPITRE 2 : GENERALITES SUR LES DECHETS

**Tableau 2.1.** Classification des déchets en Polynésie française 2018

		Déchets dangereux (I)	Déchets non dangereux (II)	Déchets inertes(III)	
<b>Déchets ménagers</b>	<b>Ordures ménagères (OM)</b>		Ordures ménagères résiduelles (OMr)	Verre	
			Déchets recyclables	Plastique non recyclable	
	<b>Déchets ménagers occasionnels</b>	Déchets ménagers spéciaux : Déchets toxiques et déchets toxiques en quantité dispersée		Déchets verts	Encombrants en métal et en plastique
				Textile (non souillé)	
				Encombrants en bois	
				Pneus	
	Carcasses de voitures				
<b>Déchets industriels</b>		Déchets industriels spéciaux : déchets des activités de soins à risques infectieux (DASRI), déchets d'amiante, déchets toxiques et déchets toxiques en quantité dispersée	Déchets assimilables aux déchets ménagers	Déchets du bâtiment et travaux publics	
			Déchets industriels banals		
			Boues d'assainissement		

### 2.4. GESTION DES DECHETS

La gestion des déchets consiste en la détermination du type de traitement à appliquer à telle ou telle autre catégorie des déchets. La question de la gestion des déchets constitue un défi majeur pour tous les pays, plus particulièrement ceux en voie de développement, car ses effets sont fortement visibles par tous. Les déchets engendrent des nuisances importantes pour les habitants et ont des conséquences néfastes sur la santé des populations, sur l'environnement et sur les ressources hydriques. La priorité en matière de gestion des déchets est la réduction à la source : cela consiste à en produire le moins possible, voire pas du tout. Dès lors que le déchet est produit, une hiérarchie des modes de traitement s'impose, justifiée par la finalité suivante : valoriser tout ce qui peut l'être afin de réduire le gaspillage des ressources sans porter atteinte à l'environnement et à la santé. En respectant les principes généraux suivant :

- réduction à la source de la quantité et de la toxicité des déchets produits.
- recyclage ou valorisation des “ sous-produits ” de la fabrication.

- prétraitement ou traitement interne ou externe enfouissement.

### 2.4.1. Méthodes de gestion des déchets

Pour assurer une bonne gestion des déchets, il faut mettre des moyens sur le plan financier que matériel, par conséquent, la bonne gestion limitera les dégâts sanitaires. C'est ainsi que nous allons examiner successivement les différents modes de gestion des déchets.

#### 2.4.1.1. Décharge

Les décharges sont la plus ancienne manière de se débarrasser des déchets, et se placent aujourd'hui en dernière position dans la hiérarchie européenne des modes de traitement des déchets [5]. Dans les pays en développement, la décharge est l'issue ultime pour plus de 90% des déchets récoltés. Les techniques d'incinération, de compostage, de bio méthanisation. Ont parfois été utilisées sans toutefois répondre aux besoins à long terme, notamment en termes de durabilité des techniques utilisées et des financements nécessaires. Globalement, un grand nombre de ces décharges sont implantées dans des zones défavorables. Or, même si elles sont fermées ou en voie de fermeture, les déchets qu'elles renferment ne disparaîtront pas et continueront à avoir un impact insidieux sur la santé publique et l'environnement [1].

#### 2.4.1.2. L'enfouissement

L'enfouissement est une méthode d'évacuation des déchets organiques qui consiste à creuser une fosse profonde de 0,5 à 1m pour y verser des déchets, asperger de l'essence et la couvrir d'une couche de terre afin de brûler sans fumée les déchets. Ce procédé utilise comme produits désinfectants ou désodorisants le chlore, la chaux, le mazout, et l'essence. Cette méthode reste très appropriée dans des formations sanitaires.

#### 2.4.1.3. L'incinération

C'est un procédé urbain d'élimination finale des déchets qui consiste à brûler au moyen d'un feu les déchets produits par les hôpitaux. Les procédés de l'incinération comprennent le ramassage des déchets et ordures, le triage pour dissocier les déchets combustible et non combustible. Elle peut être considérée comme un procédé par l'excellence de traitement des immondices, c'est une méthode satisfaisante qui présente cependant quelques inconvénients, parmi lesquels on peut citer :

- Elle nécessite une évacuation des cendres après son exécution.
- Elle provoque un danger de pollution de l'environnement par sa fumée.

- Elle nécessite un investissement et un coût d'exploitation élevés pour sa construction.

Le développement de l'incinération doit rester limité pour plusieurs raisons : le traitement par incinération apparaît peu rentable pour les petites communes même si elles se regroupent. En effet, les fours de petite taille se heurtent à des difficultés d'exploitation particulières: faible inertie thermique, traitements des gaz difficile et coûteux. D'autre part, les coûts de transport sont trop élevés pour élargir les périmètres de collecte et regrouper plusieurs agglomérations distinctes autour d'un même incinérateur. Les grosses usines d'incinération ne peuvent être construites à proximité immédiate des centres, le traitement des fumées et le stockage. Des mâchefers pro-voguent des transferts de pollution. Le traitement des gaz par des moyens efficaces (lavage, filtres électrostatiques) augmente considérablement les coûts d'investissement et les consommations d'eau et d'électricité. La récupération de chaleur et surtout d'électricité n'est rentable que pour de grosses unités [6].

#### **2.4.1.4. La décharge contrôlée**

La décharge contrôlée est un dépotoir public prévu à l'avance pour l'évacuation des ordures ménagères. Elle a l'avantage d'offrir des éléments pour l'alimentation des jardins ou des plantations d'arbres. Cette méthode n'est pas conseillée pour le traitement des déchets hospitaliers.

#### **2.4.1.5. Le compostage**

Le compostage est un procédé de décomposition des matières organiques usée de manière à le récupérer sous une autre forme permettant une utilisation ultérieure comme engrais. Est la décomposition de matières organiques par des micros organismes aérobies. Les installations de compostage gèrent la quantité d'humidité et d'oxygène et le mélange de matières organiques pour des conditions de compostage optimales. Le processus de compostage émet de la chaleur, de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone biogénique, réduisant les matières organiques brutes en masse et en volume pour créer du compost [7].

Il nécessite la préparation suivantes: réception des ordures, triage des ordures, préparation des compostes, décomposition, présentation du produit fini.

#### **2.4.1.6. Le recyclage**

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le

composent. Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement, par incinération ou autre moyens, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine. IL est défini comme la récupération de matériaux utiles, tels que le papier, le verre, le plastique et les métaux, ainsi que la transformation des matériaux, pour fabriquer de nouveaux produits afin de réduire la quantité de matières premières vierges nécessaires pour répondre aux demandes des consommateurs [7].

### **Techniques de recyclage**

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage: chimique, mécanique et organique .Le recyclage dit "chimique" utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants, Le recyclage dit "mécanique" est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer les déchets, Le recyclage dit "organique" consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz. [1].

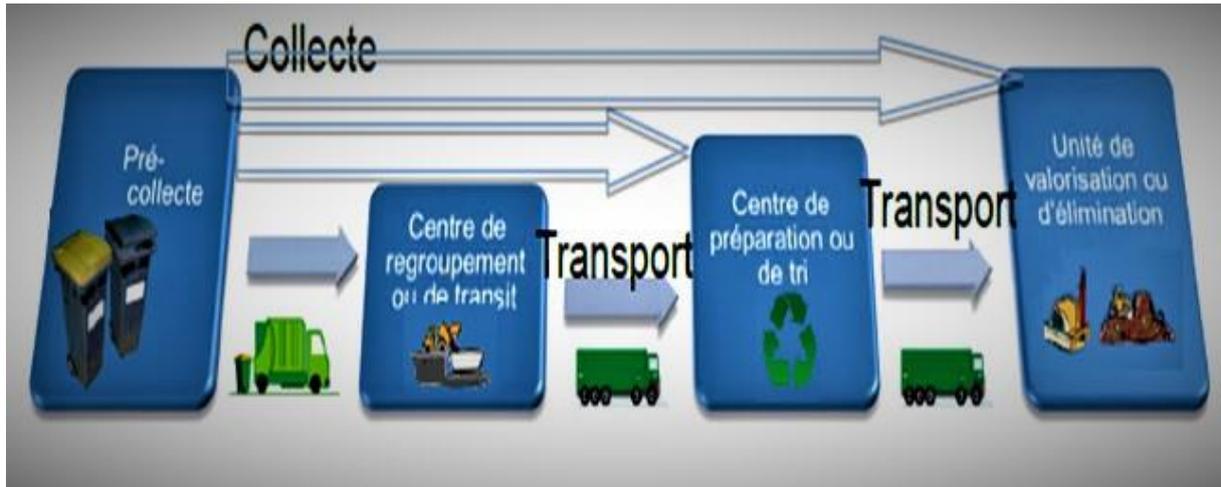
#### **2.4.1.7. Collecte, transport et stockage des déchets**

La collecte et le transport des déchets constituent une activité non négligeable en raison des moyens techniques mis en place, des coûts générés, de la masse et des volumes concernés et les distances parcourues par les déchets, ou encore de la consommation d'énergie et des émissions de polluants engendrées.

Des études du transport et logistique des déchets réalisées ont permis d'identifier quatre grandes catégories de schémas logistiques de gestion des déchets :

- le traitement direct, caractérisé par un transport d'un point de collecte vers un site de traitement (valorisation, élimination).
- la massification après collecte, grâce aux centres de regroupement.
- le passage par un ou plusieurs maillon (s) intermédiaire (s) de démantèlement, broyage ou tri avant valorisation.

La majorité des organisations logistiques en place pouvant être schématisées par la chaîne linéaire suivante :



**Figure 2.2.** Les principales étapes de transport

- pré-collecte et collecte (ramassage des déchets sur leur lieu de production).
- transit / transfert (massification des déchets collectés, passage par les quais de transit regroupement vers les centres de tri).
- tri et prétraitement (regroupement par nature de déchets, conditionnement des flux massification).
- traitement/ valorisation (orientation vers les différents sites de traitements finaux).
- débouchés industriels (réintégration des matières issues du recyclage dans les circuits de production économique).

### 2.4.1.8. Station de transfert

Une station de transfert est une installation intermédiaire entre la collecte et le traitement des déchets. Elle permet de créer une rupture de charge afin de regrouper les déchets dans un plus grand moyen de transport (par route, rail ou fleuve).

Il existe trois grands moyens de transférer les déchets :

- Les véhicules de collecte viennent vider directement dans un moyen de transept grand Capacité.
- les déchets sont déversés dans une fosse où ils sont stockés puis sont chargés dans le moyen De transport aval à l'aide d'un engin de reprise. Celle-ci est souvent intéressante pour les Gros tonnages et pour un seul flux de déchets.

- les déchets sont déversés sur une dalle où ils sont stockés puis chargés dans le moyen de transport aval. Une des caractéristiques de la dalle est qu'elle permet de réceptionner Plusieurs flux.
- La station de transfert représente également un enjeu économique dans la Chaîne globale D'acheminement des déchets vers leur lieu de traitement.

La bonne implantation d'un centre doit permettre un contrôle des coûts et une réduction des impacts environnementaux par :

- une maîtrise des temps de collecte.
- une optimisation des centres de transfert (choix du type de transfert, intégrant des évolutions récentes de gestion des déchets liée à la législation).
- une optimisation des moyens de transport vers les solutions de traitement (recyclage, récupération, valorisation énergétique, enfouissement technique) [2].

### 2.5. TRAITEMENT DES DECHETS

#### 2.5.1. Valorisation matière

Valorisation matière est un terme générique recouvrant le recyclage matière et organique, le réemploi, la réutilisation et la régénération.

- **Réemploi**

Réemploi des déchets à l'identique pour la même fonction (Déchet d'emballage, Réemploi des palettes, Renvoi des cartouches d'imprimante, Conteneurs d'acide consignes (blanchisserie) + Contenants de DIS).

- **Réutilisation**

Réutilisation du déchet en l'état pour une autre fonction (Cartons d'emballage servant à la collecte des films plastiques, des cartons, des néons, Utilisation des rebuts d'impression comme feuilles de brouillon - Réutilisation des pneus usagers sur les circuits automobiles).

- **Recyclage**

Transformation passive ou active du déchet (Réinjections des rebuts ou chutes dans le procès - Recyclage des vieux papiers en papiers utilisables.

- Recyclage des ferrailles par refonte (idem plastiques) - Déchets inertes broyés et utilisés en remblais routier).

- **Régénération**

Forme de recyclage permettant de redonner à un déchet des caractéristiques physico-chimique en vue du remplacement de l'utilisation de matières vierges (Solvants, Huiles, Résines, Bains).

- **Recyclage organique**

Traitement aérobie ou anaérobie par des micro-organismes et dans des conditions contrôlées des parties biodégradables de déchets avec production d'amendements organiques compostage.

- **Cassage d'émulsions avec traitement biologique**

Les émulsions (huiles, mélanges, eau-hydrocarbures) sont traités par déstabilisation de la phase huileuse. L'opération s'effectue à haute température, en milieu acide (acide sulfurique) et permet de séparer la phase huileuse de la phase aqueuse.

- **Déchromatation**

Réduction des sels de chrome hexa valent toxiques en chrome trivalent moins toxique et précipitable en hydroxyde de chrome.

- **Décyanuration**

Les cyanures de bains de traitement de surface sont oxydés en cyanates (par chloration alcaline à l'hypochlorite de sodium).

- **Déshydratation mécanique**

Ce traitement, souvent utilisé pour les boues, consiste en une filtration, une centrifugation ou un séchage. Plusieurs types de filtres sont utilisés : filtre continu sous vide, filtre presse, filtre à bandes.

- **Neutralisation**

Processus chimique consistant à traiter les acides des fumées des incinérateurs en les faisant réagir avec une base (de la chaux en général ou de la soude). Cette réaction provoque la formation d'eau et d'un sel. L'acide chlorhydrique étant en plus grande quantité que les autres, on utilise souvent le terme de déchlorurations pour celui de neutralisation.

### 2.5.2. Valorisation thermique

#### ➤ Incinération en cimenterie

(Sables de fonderie + Pneumatiques).

#### ➤ Incinération en UIOM, en centrale thermique

Distinguer l'incinération avec valorisation énergétique qui est considérée comme une technique de valorisation de l'élimination simple qui est une élimination.

#### ➤ Pyrolyse, Thermolyse

- **Pyrolyse**

Décomposition ou destruction par l'action de la chaleur en atmosphère inerte. Désigne quelquefois la première étape de combustion.

- **Thermolyse**

Synonyme de pyrolyse. S'emploie pour qualifier certains procédés de pyrolyse à des températures plus basses, ou opérantes sous pression réduite.

#### ➤ Gazéification, vapocraquage

- **Gazéification**

cette technique permet de transformer une biomasse en gaz combustible, en vue d'une valorisation énergétique, sans avoir recours à la combustion et la technologie s'applique à toutes les matières organiques et biomasse résiduaire et Le gaz obtenu peut servir directement à la production d'énergie ou en mélange avec du gaz naturel.

- **Vapocraquage**

Comme le craquage catalytique, il consiste à casser les molécules de la charge, par pyrolyse, pour obtenir des molécules plus petites il est réalisé en présence de vapeur d'eau, ce qui sert à diluer les hydrocarbures pour éviter les réactions parasites d'aromatization des cycloalcanes ou de (Diels.Alder) aboutissant à la formation de goudrons et de coke par condensation.

**2.5.3. Stockage et Stabilisation pour les déchets dangereux**

- **Solidification**

Technique utilisée traditionnellement pour le nucléaire et Réaction de l'eau libre contenue dans le déchet avec un liant hydraulique afin de lui donner une structure solide et Ce traitement regroupe toutes les techniques permettant la transformation du déchet en un solide compact. S'accompagne souvent d'une phase de stabilisation de la toxicité des produits.

- **Vitrification**

La vitrification consiste à chauffer les déchets à traiter jusqu'à leur fusion (classiquement, à partir de 1400°C). La fusion à haute température des composants propres du déchet et d'éventuels ajouts complémentaires conduit à une fixation physico-chimique des polluants dans une matrice vitreuse et les vitrifiâtes obtenus sont proches par leur composition et leur structure, de matériaux naturels type basalte.

- **Fixation physique et chimique**

Les polluants sont entourés d'une enveloppe imperméable et chimiquement inerte, enrobage encapsulation. Et la technique consistant en l'immobilisation des polluants dans une matrice par formation de liaisons chimiques entre les polluants et les composés de la matrice.

**Tableau 2.2.** Classement des solutions de traitement des déchets les plus importants

<b>Flux de déchets</b>	<b>Choix le plus adapté</b>	<b>Choix intermédiaire</b>	<b>Choix le moins adapté</b>
<b>Déchets verts</b>	Compostage	Valorisation énergétique	Enfouissement
<b>Verre</b>	Valorisation locale par concassage	Exportation pour traitement	Enfouissement
<b>Plastique et métal</b>	Exportation pour traitement	Filière de recyclage locale	Enfouissement
<b>Papier et carton</b>	Compostage	Valorisation énergétique	Exportation pour traitement
<b>Déchets ultimes</b>	Incinération et valorisation énergétique	Incinération sans valorisation énergétique	Enfouissement
<b>Encombrants</b>	Réutilisation locale	Filière de recyclage locale	Enfouissement
<b>Déchets dangereux</b>	Exportation pour traitement	Valorisation locale	Incinération

## **Références bibliographiques du deuxième chapitre**

- [1]. Moupele.N., Proposition d'un plan de gestion des déchets applicable dans les pays en développement, Mémoire de master, Université Porto, Portugal 2013.
- [2]. Matthias Staub. Approche multi-échelle du comportement bio- mécanique d'un déchet non dangereux, Université Joseph-Fourier, Grenoble, France 2010.
- [3]. [https://www.google.com/url?client=internal-element-cse&cx=004887349878769931675:tr8rd6q1ylk&q=http://www.dphu.org/uploads/attachement\\_s/books/books\\_1159\\_0.pdf&sa=U&ved=2ahUKEwj-reS73bnpAhUaRRUIHT7GCJAQFjAAegQIABAC&usg=AOvVaw30XKTUapEMtZVG5jBTZRD3](https://www.google.com/url?client=internal-element-cse&cx=004887349878769931675:tr8rd6q1ylk&q=http://www.dphu.org/uploads/attachement_s/books/books_1159_0.pdf&sa=U&ved=2ahUKEwj-reS73bnpAhUaRRUIHT7GCJAQFjAAegQIABAC&usg=AOvVaw30XKTUapEMtZVG5jBTZRD3).
- [4]. Boulifa.M et Debabi.A., Utilisation de poudre de verre dans le mortier Mémoire de master, Université Kasdi Merbah, Ourgla, Algérie 2017.
- [5]. <https://www.cniid.org/+Decharges,7-+>.
- [6]. Archive de l'intégration européenne, Commission des communautés européennes Environnement et qualité de la vie collective, Elimination et récupération des emballages non biodégradables.
- [7]. E.P.A, Advancing Sustainable Materials Management, Facts and Figures Environmental Protection Agency, United States, 2017.

# CHAPITRE 3 :

VALORISATION DES DECHETS

DE VERRE

DANS LE DOMAINE

DE GENIE CIVIL

*Ce troisième chapitre expose la structure et les composants du verre*

*La valorisation de poudre de verre en génie civil*

*Comparaison des études.*

## **Chapitre 3**

# **VALORISATION DES DECHETS DE VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL**

### **3.1. INTRODUCTION**

L'utilisation du verre comme ajout cimentaire dans le béton peut être une avenue très intéressante dans l'industrie du ciment et béton du fait que le verre est un matériau amorphe Avec une composition chimique proche des autres ajouts connus (Fumée de silice, Laitier, Cendre volante) [1].

Dans le présent chapitre, on expose les résultats des études scientifiques menées sur la valorisation des déchets de verre dans le génie civil et plus particulièrement dans l'industrie cimentaire.

### **3.2. HISTORIQUE**

Le verre existe déjà naturellement depuis plusieurs centaines de milliers d'années. L'homme l'utilisa pour la première fois il y a 100 000 ans sous forme d'obsidienne, (verre naturel d'origine éruptive) pour fabriquer des outils, des armes coupantes et des bijoux. L'origine des verres remonte à la plus haute Antiquité. Il y a six milles ans, des potiers Egyptiens ont fabriqué le premier verre tout à fait par accident en cuisant leurs poteries. Le premier verre était un émail, mélange de sable et d'autres minéraux fondus sur la surface d'objets en céramique. Il y a trois mille ans, des artisans découvrirent que si l'émail avait une épaisseur suffisante, il pouvait servir seul à fabriquer des objets sans pour autant qu'il soit supporter par la terre cuite.

Un texte Latin de Pline raconte que le verre devrait sa naissance à un concours de circonstances. Il semblerait que le verre ait plus de 5000 ans. En effet, lors de nombreuses fouilles effectuées en Egypte, les archéologues ont retrouvé divers petits objets en verre : petits flacons de parfum, coupes, perles, etc. Ces objets antiques étaient opaques et colorés en vert ou en bleu.

Les premiers verriers s'aperçurent qu'ils pouvaient faire fondre le sable plus facilement en ajoutant de la soude au contenu de leurs fours. La soude ou la potasse sous forme de cendres

## CHAPITRE 3: VALORISATION DES DECHETS DE VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

---

de bois abaissait le point de fusion du sable à tel point que les fours ordinaires permettaient d'atteindre les températures nécessaires. Mais la seule addition de la soude n'était pas suffisante pour faire du verre de bonne qualité : celui-ci avait une vie courte et même l'eau l'attaquait. Suite à quoi, on découvrit qu'en ajoutant la chaux, sous forme de calcaire broyé, le verre obtenu n'était plus attaqué par l'eau. C'est là une formule de base connue maintenant sous le nom de verre à la chaux sodique [2].

### 3.3. DEFINITION DU VERRE

Dans le langage courant, le mot verre sert à désigner un matériau dur, fragile (cassant) et transparent. Dans le langage scientifique, le mot verre désigne un matériau amorphe, c'est-à-dire non cristallin [1].

### 3.4. STRUCTURE DU VERRE

#### 3.4.1. Composition chimique du verre

La composition chimique du verre dépend de ces éléments et leurs caractéristiques, en générale sa composition est celle présentée sur le tableau 3.1.

**Tableau 3.1** : Composition chimique du verre [1].

Sable ( $\text{SiO}_2$ )	68 à 74 %
Oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	12 à 16%
Chaux ( $\text{CaO}$ )	7 à 14 %
Potasse ( $\text{K}_2\text{O}$ )	1%
Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	0,3 à 3 %
Oxyde d'antimoine ( $\text{SbO}$ )	0,3 à 3 %

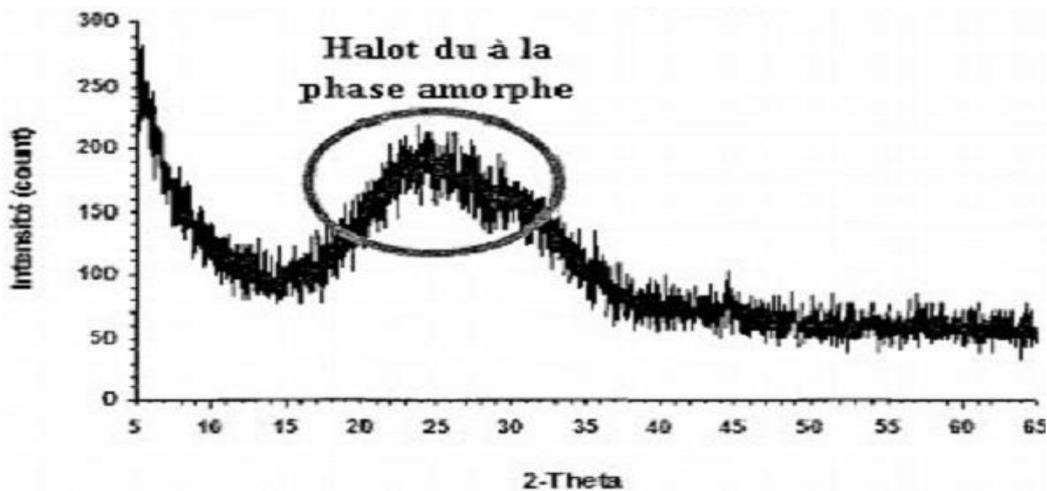
#### 3.4.2. Structure vitreuse du verre

La (figure 3.1). Présente un DRX sur une particule de verre qui présente un halot montrant la phase amorphe de ce matériau. [1].

Par verre, on désigne «un solide non cristallin, présentant le phénomène de transition vitreuse». Cette définition est plus générale, elle englobe les matériaux amorphes, c'est à dire

### CHAPITRE 3: VALORISATION DES DECHETS DE VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

les matériaux obtenus par refroidissement, mais exclut les matériaux non cristallins qui n'ont pas la stabilité interne requise [3].



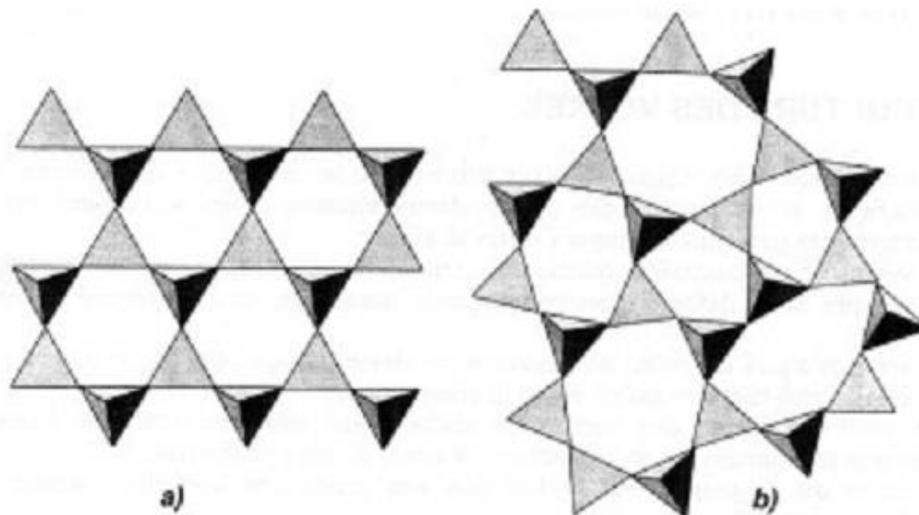
**Figure 3.1 :** Diffractogramme des rayons «X» du verre (Laboratoire des Matériaux Cimentaires Alternatifs, Université de Sherbrooke) [1].

En effet, l'état vitreux est un état solide métastable, qui peut présenter un ordre au niveau des liaisons interatomiques mais qui est désordonné, tout comme les liquides, à plus grande échelle [4].

L'état solide est plus ordonné que l'état gazeux ou que l'état liquide : les cristaux en sont une bonne illustration.

Il existe des solides apparemment moins ordonnés : verre, polymères vitreux et des solides partiellement ordonnés comme les polymères semi-cristallins. Pour tous ces matériaux non-cristallins, il existe fréquemment une certaine forme d'ordre à courte distance, même si ce n'est pas l'ordre cristallin.

Si l'on fond des cristaux de quartz naturel, on constate après refroidissement brutal que le matériau manifeste des propriétés différentes de celles du matériau initial. On obtient un verre : silice vitreuse. L'étude approfondie de la silice vitreuse, en particulier par diffraction des rayons X, montre que les distances interatomiques imposées par les liaisons covalentes sont toujours respectées. Les tétraèdres continuent à exister dans la silice vitreuse, comme dans la cristobalite, mais il n'y a pas de motif qui se répète périodiquement (Figure 3.2). [5].



**Figure 3.2 :** a) Structure en anneau de la Cristobalite; b) Modèle proposé par Zacharassen en : les tétraèdres continuent d'exister en formant un réseau continu irrégulier et sont désorientés dans les trois dimensions [5].

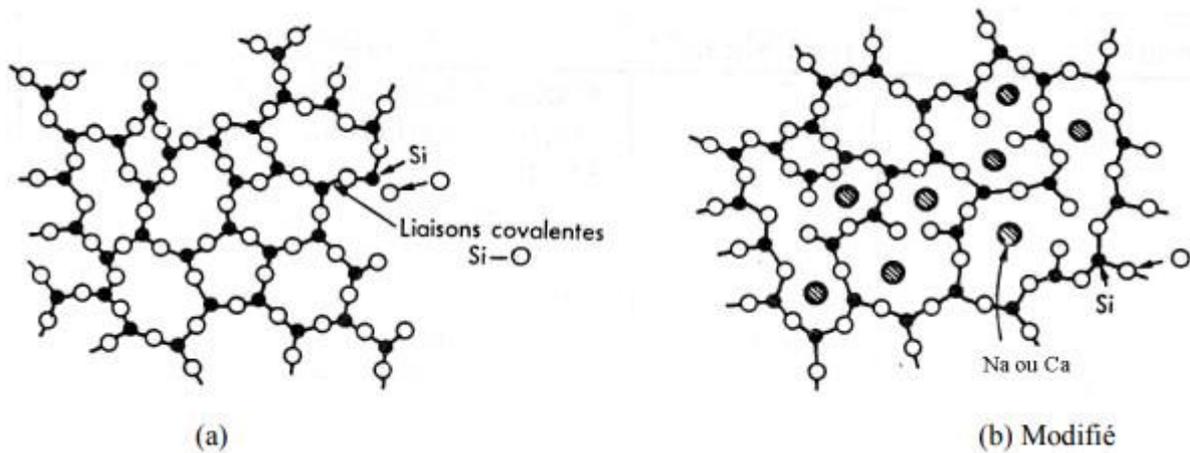
(Lebedev, 1921) avait proposé un modèle pour le verre prévoyant l'existence de très petits domaines ordonnés appelés cristallites et reliés les uns aux autres par des domaines désordonnés.

La théorie de (Zacharassen, 1932) Décrit la silice vitreuse comme un réseau désordonné conservant les assemblages  $\text{SiO}_4$  de la cristobalite. Le passage de la cristobalite à l'état vitreux s'explique par une trop grande viscosité du liquide qui empêche les tétraèdres désordonnés de reformer la cristobalite. Le matériau n'est ni totalement désordonné (conservation des tétraèdres), ni dans un état métastable au sens de la thermodynamique mais il évolue simplement vers l'état cristallin avec une cinétique très lente. (Zacharassen, 1932) en a formulé les quatre conditions suivantes pour la formation des verres d'oxydes :

- La coordinance du cation doit être petite.
- Un ion d'oxygène ne doit pas être lié à plus de deux cations.
- Les polyèdres construits par les oxygènes ne peuvent avoir en commun que leurs sommets et non leurs arêtes ou leurs faces.
- Trois sommets au moins de chaque polyèdre doivent appartenir en même temps à d'autres polyèdres.

L'état vitreux est donc caractérisé par un désordre (Figure 3.3), proche de celui d'un liquide qui tend à cristalliser. La cinétique de cristallisation est, en général, suffisamment lente pour

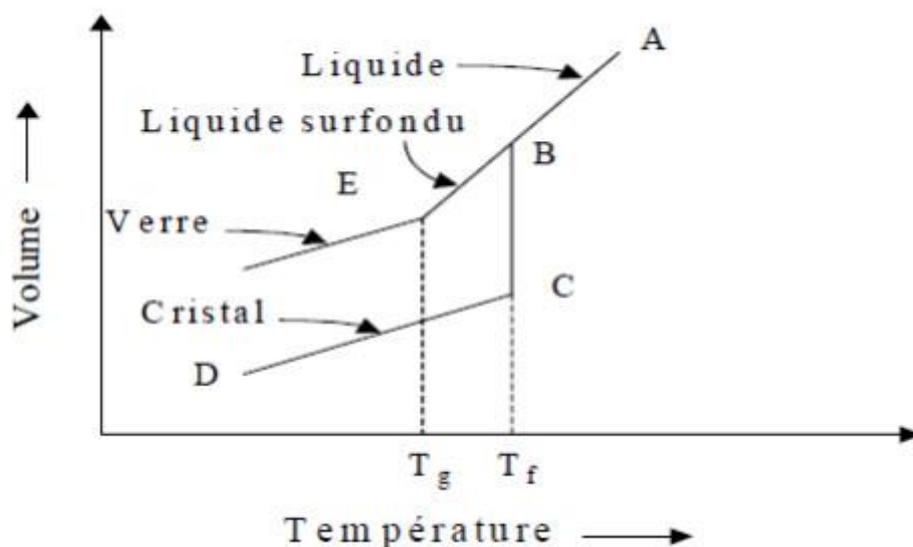
que le matériau apparaisse comme stable à l'échelle de la vie humaine [5].



**Figure 3.3 :** (a) l'empilement des atomes de la silice amorphe, (b) l'adjonction de  $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{CaO}$  brise des liaisons dans la silice amorphe et donne naissance au verre sodo-calcique [5].

Le passage continu de l'état liquide à l'état vitreux se fait dans une plage de température délimitée par la température de fusion ( $T_f$ ) et la température de transition vitreuse ( $T_g$ ).

La zone de transition vitreuse encadre ( $T_g$ ) En dessous de ( $T_f$ ), le verre devient "hors équilibre": Il s'éloigne de son équilibre thermodynamique, puisque les mobilités atomiques ne sont plus suffisantes (la viscosité augmentant) pour que l'équilibre soit atteint (il s'éloigne donc d'autant plus de l'équilibre que la vitesse de refroidissement est élevée) [1].



**Figure 3.4 :** Variation spécifique du verre avec la température, relation entre les états solide, liquide et vitreux [1].

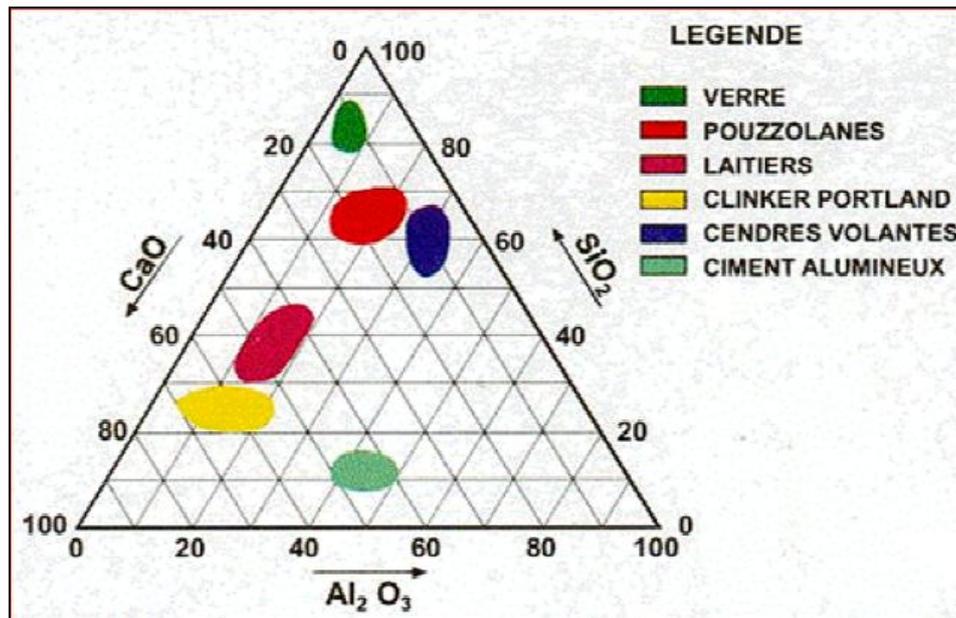


Figure 3.5 : Position du verre dans le système CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [6].

### 3.5. COMPOSANTS DU VERRE

Les principaux constituants du verre peuvent être classés en cinq catégories en fonction de leur rôle dans son élaboration :

#### 3.5.1. Les vitrifiants

Constituent la partie la plus importante, ou on trouve :

- **La silice :**

(Dioxyde de silicium SiO<sub>2</sub>) c'est le composant principal du verre. Il représente environ 70% de la masse, il est le formateur de réseau. Si l'on augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre. Son point de fusion est à 1730°C. Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation n'est faible ; donc plus le verre est résistant.

- **L'anhydride borique :**

(Le Bore ou borax anhydre B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) diminue le coefficient de dilatation et améliore la résistance aux chocs thermiques, il est aussi plus résistant à l'eau et il possède les propriétés d'un fondant.

- **L'anhydride phosphorique :**

(Le phosphore  $P_2O_5$ ) employé dans le domaine de l'optique.

### 3.5.2. Le fondant

- Il abaisse la température à laquelle le verre devient suffisamment fluide pour être façonné (La silice fond à  $1700^{\circ}C$ ).
- Ce sont les oxydes de calcium et de potassium qui jouent le rôle De fondant.
- Ils sont de trois types : le natron d'Egypte (carbonate de calcium), les cendres Végétales sodiques (salicorne), les cendres végétales potassiques (fougères, Hêtres...)

### 3.5.3. Le stabilisant

- Il empêche que la surface du verre ne devienne déliquescence et que le Verre ne finisse par se dissoudre dans l'eau.
- Il augmente aussi la résistance mécanique du Verre, sa dureté et sa brillance. La chaux est le stabilisant le plus répandu.

### 3.5.4. Colorants

- Les verres sont le plus souvent teints, par l'agent d'oxydes métalliques pendant la fusion : Oxyde de cuivre pour du verre.

### 3.5.5. Les affinant

- Les affinant servent a éliminé les bulles gazeuses générées par les réactions chimiques.
- Les principaux affinant sont les nitrates (de potasse, de soude, de soufre) et aussi P arsenic, Ces deux derniers constituants peuvent être ajoutés suivant les caractéristiques Recherchées Du verre [1].

## 3.6. VALORISATIONS DE POUDRE DE VERRE EN GENIE CIVIL

- Les déchets de verre ont une grande valeur dans le domaine de construction. Ces derniers peuvent être valorisés de plusieurs façons dans le domaine de construction. Un nombre important de recherches scientifiques sont publiées récemment étudiants la possibilité et la faisabilité de l'utilisation des déchets de verre comme substituant des granulats naturels (sable et/ou gravier), du ciment ou le clinker dans le ciment. D'une manière générale [2] :

## CHAPITRE 3: VALORISATION DES DECHETS DE VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

---

- La valorisation des déchets de verre est une alternative à l'extraction intensive de granulats coralliens qui a un impact négatif sur l'environnement destruction des récifs, mauvaise qualité de l'eau.
- Il peut être employé dans diverses applications comme la construction de massif drainant ou encore en tant que sous-couche pour les stationnements. Son incorporation dans les bétons auto-plaçant (BAP) offre une fluidité considérable.
- Il peut être utilisée dans le béton pour couler des murs porteurs du bâtiment ainsi que les dalles de plancher des bureaux.
- Il peut être utilisé dans les projets de construction des maisons, trottoirs et dans le pavé uni.
- Il peut être utilisée remplacer une partie du ciment dans les bétons binaires et ternaires qui sont recommandés pour les ouvrages d'art [2].



**Figure 3.6 :** Verre recyclé (la poudre et agrégats) dans le béton non structural [2].

### 3.6.1. Utilisation de la poudre de verre comme substituant du ciment

Nous sommes intéressés dans le présent travail à l'utilisation de la poudre de verre comme ajout. Pour cette raison, nous allons exposer seulement les résultats des travaux traitant la valorisation de cette poudre dans le béton, le mortier, et ciment.

### 3.6.2. Préparation de la poudre de verre

Les poudres de verre sont obtenues par broyage des granulats de verre de bouteilles ou du verre plat de construction triés et séchés au laboratoire. Le tri est effectué manuellement et consiste à étaler une quantité des granulats de verre concassés sur une table puis les débarrasser des impuretés ou tamisée sur un tamis de 5mm pour être débarrassée de tout débris et déchets de papiers ou plastique avant d'être utilisée dans les systèmes cimentaires.

## CHAPITRE 3: VALORISATION DES DECHETS DE VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

Le verre trié est ensuite mis dans une étuve à 100°C, pour le sécher afin d'éliminer l'humidité avant broyage. Ce dernier est effectué généralement au moyen des broyeur à boulets et avec des séquences répétées. La répétition s'effectue dans un intervalle de temps régulier d'au moins 45 min pour favoriser le repos du broyeur (refroidissement) afin de limiter les risques d'agglomération et de colmatage de la poudre sur les corps broyant et sur les parois du broyeur. La durée du broyage est fonction de la finesse désirée et permet ainsi d'évaluer l'énergie de broyage correspondante à une finesse obtenue. [8].



Figure 3.7 : Broyeur à boulets



Figure 3.8 : poudre de verre générée.

### 3.6.3. Réaction pouzzolanique (ciment-verre)

La réaction pouzzolanique de la poudre de verre dans une matrice cimentaire désigne donc la réaction en présence d'eau, de la silice amorphe du verre avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment [9]. Selon la réaction suivante :



### 3.6.4. Facteurs influençant la réaction pouzzolanique

Ils existent plusieurs facteurs qui influent sur la réaction pouzzolanique de la poudre de verre : la finesse du verre, le taux du verre, la couleur du verre et la température de murissement, La finesse du verre: plus la finesse du verre est élevée, meilleure est son activité pouzzolanique.

(Shayan et al, 2004) [11]. Dans leur étude ont remarqué que :

- La poudre de verre de finesse Blaine relativement élevée de 800 m<sup>2</sup>/kg développe des réactions pouzzolaniques importantes.

## CHAPITRE 3: VALORISATION DES DECHETS DE VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

- Le taux du verre : La résistance des mortiers et des bétons diminue en fonction de leur teneur en verre [8].

D'autres études sur le béton ordinaire réalisé par (Shayan et al, 2006) [12]. Montrent que :

- On peut incorporer jusqu'à 30 % de la poudre de verre en remplacement partiel du ciment.
- La couleur du verre : Le verre de couleur brune est le verre qui possède la plus faible activité Pouzzolanique derrière le verre vert puis le verre blanc.
- Une température : La température de cure élevée accélère l'activation de la réaction pouzzolanique du verre (Idir, 2009) [13].

Et d'autre étude de (SHI et coll, 2005b) [14]. Porte sur des poudres de verre de différentes finesses. Les surfaces spécifiques Blaine des poudres de verre GP- dust, GP-4000 et GP-6000 sont respectivement 264 m<sup>2</sup>/kg, 467 m<sup>2</sup>/kg et 582 m<sup>2</sup>/kg.

Les résultats de cette étude montrent que la réaction pouzzolanique est d'autant plus importante que la finesse est élevée. Ils ont également observé qu'une augmentation de la température de murissement des échantillons accélère l'activation de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre et des cendres volantes. Les résultats de cette est illustrés dans la (figure 3.9) [8].

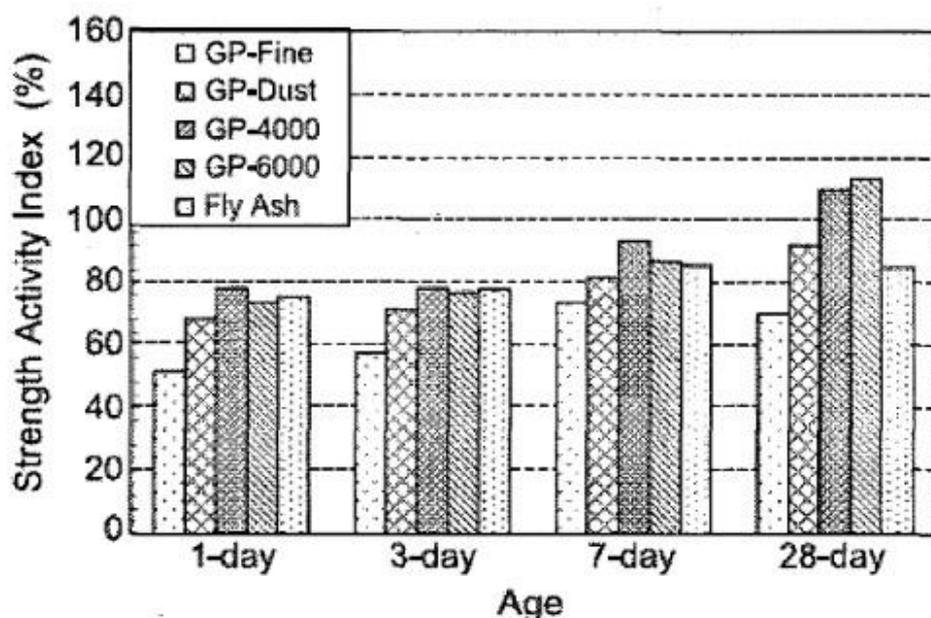


Figure 3.9 : Activité pouzzolanique de la poudre de verre (SHI et coll, 2005b) [14].

### 3.6.5. La réaction alcali-silice (ciment –verre)

### CHAPITRE 3: VALORISATION DES DECHETS DE VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

La forte teneur en silice du verre laisse prévoir qu'il peut développer d'importante réaction alcali-silice lorsqu'il est utilise comme substituant partiel des granulats dans le béton. Par contre lorsqu'il est broyé et utilise comme ajout cimentaire, cette propriété est utilisée à l'avantage pour développer d'important effet pouzzolanique suite a la réaction pouzzolanique entre la silice et la portlandite. [8].

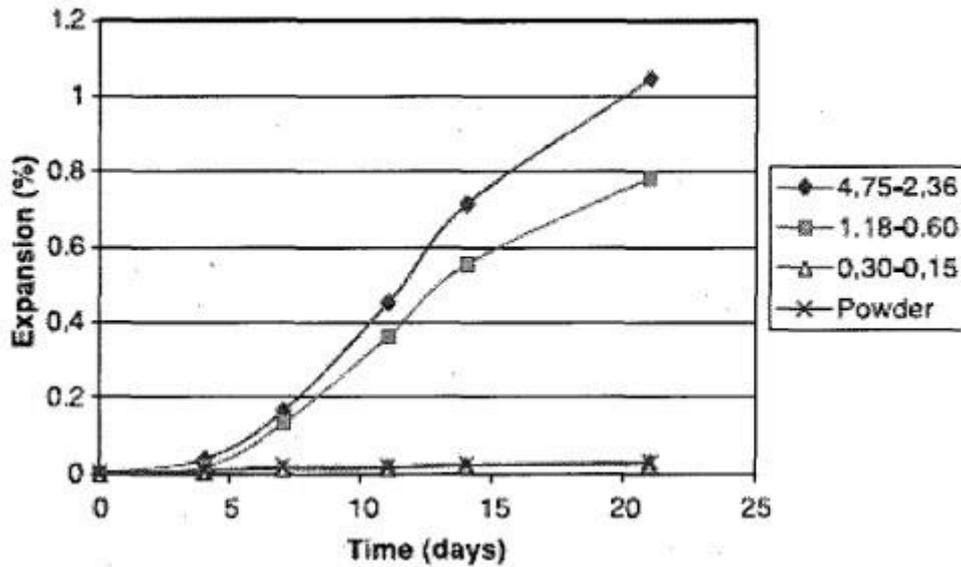


Figure 3.10 : Expansion due à la RAG sur des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles (SHAYAN et coll, 2004) [11].

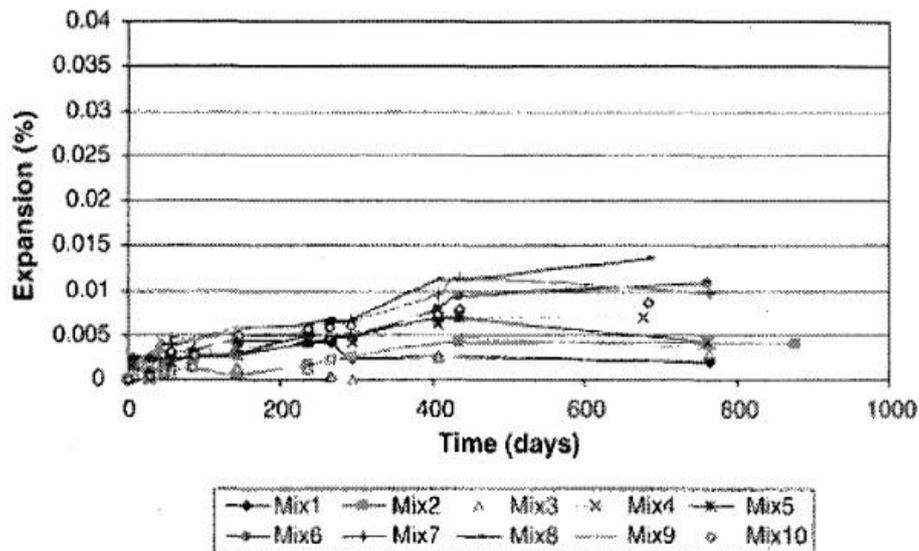


Figure 3.11 : Resistance à la réaction alcalis-granulat des bétons, 38°C et 100% HR (SHAYAN et coll, 2006) [12].

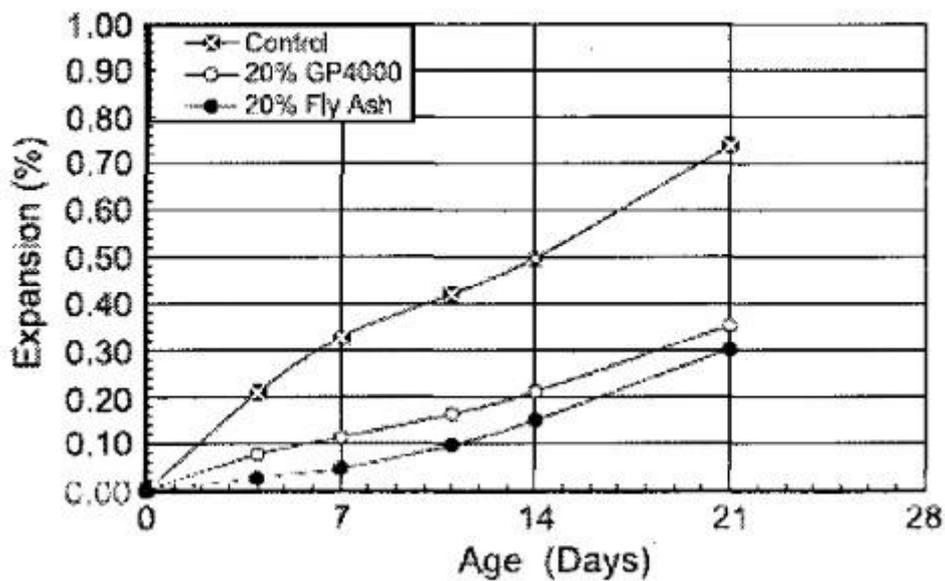


Figure 3.12 : Expansion due a la RAG a 23°C (SHI et coll, 2005b) [14].

### 3.6.6. Rôle des pouzzolanes dans la réduction des expansions dues a la réaction alcali-silice (ciment -verre)

Les cendres volantes diminuent le coefficient de diffusion des alcalis, ce qui diminue l'alcalinité de la solution interstitielle. Cette réduction du coefficient de diffusion est due en partie à la densification de la matrice cimentaire, ce qui veut dire une diminution de la porosité et une plus grande finesse des pores et à la réaction pouzzolanique.

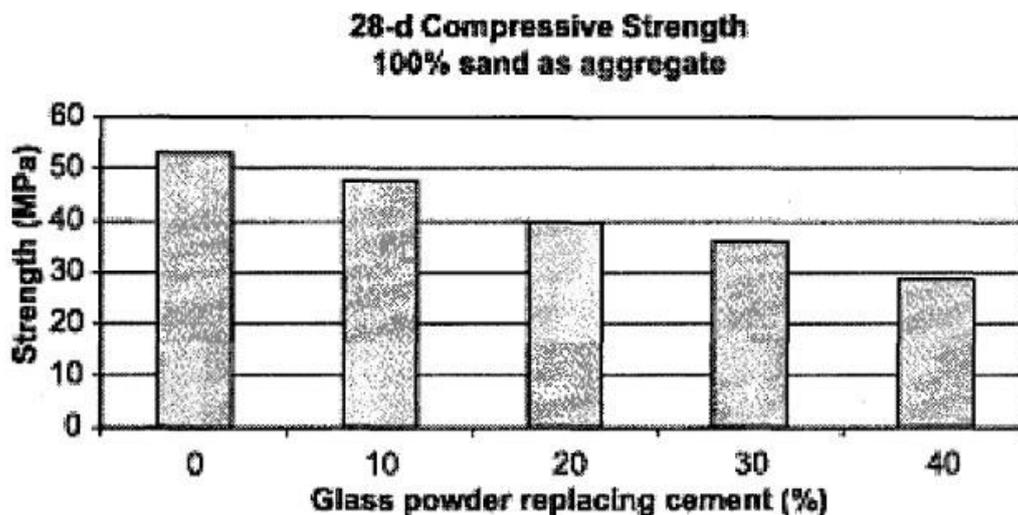
Les gels de C-S-H créés par la réaction pouzzolanique des cendres volantes sont capables de fixer des alcalis, ce qui les retire de la solution interstitielle. La solution restante est donc moins alcaline, ce qui va diminuer la formation de gels expansifs. Il est également mentionné dans des études que les mortiers incorporant des cendres volantes développent des résistances à la traction plus élevée dans le temps ce qui retarde l'apparition des premières fissures due à l'expansion. Cela évite également le transport des alcalis par lesdites fissures, ce qui accélérerait le processus de RAS. Dans sa thèse, (Idir, 2009) [13]. mentionne que les fines de verre soit la poudre de verre peut servir à inhiber l'expansion. Cependant, il faut rester prudent, car la teneur élevée en alcalis du verre peut fournir une grande quantité d'alcalis à la solution interstitielle pouvant entraîner des expansions importantes. Selon ces études, les mécanismes de contrôle de la poudre de verre sur l'expansion sont les mêmes que ceux évoqués par (Shi et al. 2005) [14]. ont expérimentés sur des mortiers incorporant des cendres volantes (20%) ou de la poudre de verre (20%). Ces derniers ont développé des expansions beaucoup plus faibles que celle du témoin, mais les expansions développées sont supérieures

à la limite de 0,10% à 14 jours. Le mortier avec cendres volantes a une expansion plus faible que celui avec poudre de verre. Ces derniers mentionnent qu'un remplacement de 30% du ciment par des cendres volantes est généralement recommandé afin de contrer l'expansion délétère due à la RAS [11].

### **3.6.7 Resistance à la compression des mortiers formulés à base de la poudre de verre**

(Shayan et coll, 2004) [11]. ont étudié l'effet de la substitution partielle du ciment portland par la poudre de verre sur la résistance à la compression du mortier. Ils ont remarqué :

- une diminution de la résistance à la compression lorsque le taux de remplacement par la poudre de verre augmente.
- Les indices de pouzzolanité à 28 jours respectifs des mélanges avec 10%, 20%, 30% et 40% de poudre de verre sont d'environ 92%, 77%, 71% et 58% [8].



**Figure 3.13 :** Resistance à la compression des mortiers incorporant la poudre de verre (SHAYAN et coll, 2004) [11].

## **3.7. COMPARAISON DES ETUDES**

La finesse de la poudre de verre est un facteur très important au développement des propriétés pouzzolaniques. Plus la poudre n'est fine, meilleure sera les caractéristiques mécaniques du mortier Dans cette recherche, (Nara.Y, Guenchouba.Dj) [15]. ont substitué une partie de ciment CPA par l'ajout de la poudre de verre. Ils ont utilisés trois types de poudres de verre de finesse différentes PV30 (SSB=3000cm<sup>2</sup>/g), PV45 (SSB=4500cm<sup>2</sup>/g), et PV70 (SSB=7000cm<sup>2</sup>/g). Les mélanges des ciments étudiés sont représentés dans le tableau 3.2.

## CHAPITRE 3: VALORISATION DES DECHETS DE VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

**Tableau 3.2** : Mélanges des ciments étudiés [15].

Type de ciment	Verre (PV)
100% CEM	0%
90% CEM+10% PV30	10%
80 % CEM+20% PV30	20%
90 % CEM+10% PV45	10%
80 % CEM+20% PV45	20%
90 % CEM+10% PV70	10%
80 % CEM+20% PV70	20%

Les résultats de la mesure de la résistance mécanique à la compression et à la flexion aux échéances 2 jours et 28 jours des mortiers confectionnés sur des éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm<sup>3</sup> sont représentés dans le tableau 3.3 :

**Tableau 3.3** : Résistances mécaniques des mortiers en fonction du taux de verre [15].

Echantillons	Consistance	Résistance à la compression		Résistance à la flexion	
		2j	28j	2j	28j
0%	6.5	19.68	30.575	11.563	17.948
10 % PV30	7	18.475	31.42	15.521	18.646
20 % PV30	10	20.926	26.59	15.156	15.542
10 % PV45	8	19.268	31.07	12.968	17.635
20 % PV45	14	17.15	24.36	5.938	14.635
10 % PV70	8	22.336	33.036	7.687	18.521
20 % PV70	17	18.17	25.81	6.188	15.188

Ils ont conclu que :

- L'addition progressive de la poudre de verre dans le mortier jusqu'à 20%, a entraîné une légère diminution des résistances mécaniques par rapport à celle du témoin au jeune âge. Ces résistances sont comparables avec celle du mortier témoin.
- A 28 jours, l'incorporation de la poudre de verre à des taux de 10 % augmente nettement la résistance à la flexion des mortiers.
- Les mortiers élaborés avec 10% de poudre de verre développent des résistances légèrement supérieures par rapport à celle du mortier témoin. Cette augmentation est en fonction de la finesse de la poudre de verre, et l'optimum s'obtient pour 10% de (PV70).

### CHAPITRE 3: VALORISATION DES DECHETS DE VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

- Cette amélioration de la résistance peut être expliquée par l'effet physique : augmentation de la compacité de la pâte et chimique: réaction pouzzolanique de la poudre de verre avec les produits d'hydratation du clinker pour former des C-S-H denses responsables du développement de la résistance.
- L'augmentation de la teneur en verre dans les ciments augmente la demande en eau. Lorsque la finesse de la poudre de verre augmente, la consistance diminue et la demande en eau augmente.

La résistance mécanique à (la compression et la flexion), la consistance et la densité des mortiers préparés par le remplacement du ciment par la poudre de verre en raison de 5%, 10% (Saoud.H) [16]. a conduit l'obtention des résultats similaires aux résultats de la première étude.

Les résultats de ce travail sont représentés dans le tableau 3.4 :

**Tableau 3.4** : Résistances mécanique des mortiers en fonction du taux de poudre de verre [16].

Ciment préparés	Ciment témoin	C+5% de verre	C+10 % de verre
Résistance à la compression 2j (MPa)	21.1	18.0	16.5
Résistance à la compression 7j (MPa)	35.6	32.5	29.9
Résistance à la compression 28j (MPa)	45.5	40.3	37.7
Résistance à la flexion 2j (MPa)	4.4	3.9	3.6
Résistance à la flexion 7j (MPa)	5.8	5.6	5.3
Résistance à la flexion 28j (MPa)	6.8	6.7	6.1
Consistance E/C (%)	28.9	28.8	28.6
Densité	3.10	3.08	3.06

Elle a constaté que :

- Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement avec l'âge.
- Les résistances à la compression et à la flexion diminuent avec l'augmentation du pourcentage d'ajout poudre de verre et poudre au jeune âge.
- Les résistances du mortier témoin sont supérieures aux celles des mortiers contenant la poudre de verre.
- L'ajout de la poudre de verre diminue la consistance et densité des mortiers.

### CHAPITRE 3: VALORISATION DES DECHETS DE VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

---

L'étude réalisée par (Boulifa. M, Debabi. A) [17]. qui consiste à mesurer la résistance mécanique (à la compression et à la flexion) et la densité des mortiers préparés par le remplacement du ciment par la poudre de verre en raison de 5%, 10% , 15%, 20%, 25%

A conduit a l'obtention des résultats similaires aux résultats des deux études.

Les résultats de ce travail sont représentés dans le tableau 3.5 :

**Tableau 3.5 :** Evolution des résistances mécanique des mortiers en fonction du taux de poudre de verre [17].

Ciment préparés	C+5% verre	C+10% verre	C+15% verre	C+20% verre	C+25% verre
Résistance à la compression 4j (MPa)	11.74%	2.99	1.62	15.25	10.75
Résistance à la compression 7j (MPa)	14.84%	3.72	22.34	14.89	8.5
Résistance à la compression 28j (MPa)	0.76%	13.94	20.61	11.63	26.01
Résistance à la flexion 4j (MPa)	1.69%	10.01	3.35	11.7	10.02
Résistance à la flexion 7j (MPa)	6.45%	2.16	13.98	15.05	22.52
Résistance à la flexion 28j (MPa)	23.06%	15.81	19.43	18.84	0.12
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	2.157	2.170	2.220	2.114	2.185

L'étude réalisée par (Nguyen.H) [18]. qui consiste à mesurer la résistance mécanique (à la compression et à la flexion) des mortiers préparés par le remplacement du ciment par la poudre de verre en raison de 0%, 15%, 20%, 25% a court terme et de 0%, 10%, 20%, 35% a long terme a conduit a l'obtention des résultats similaires aux résultats des deux études.

Les résultats de ce travail sont représentés dans le (tableau 3.6) et (tableau3.7)

### CHAPITRE 3: VALORISATION DES DECHETS DE VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

#### ➤ A court terme

Les résultats de (Nguyen.H)[18]. sont représentés dans le tableau 3.6 :

**Tableau 3.6 :** L'évolution de la résistance à la compression et la flexion en fonction du temps à court terme des mortiers M0, M15, M20, M25 [18].

Ciment préparés	M0 (0%) verre	M15 (15%) verre	M20 (20%) verre	M25 (25%) verre
Résistance à la compression 4j (MPa)	37	28	27	26
Résistance à la compression 7j (MPa)	37	36	33	28
Résistance à la compression 14j (MPa)	48	43	40	34
Résistance à la compression 28j (MPa)	51	46	43	40
Résistance à la flexion 4j (MPa)	7.2	6.4	6.8	6.1
Résistance à la flexion 7j (MPa)	7.6	7.7	7.1	6.6
Résistance à la flexion 14j (MPa)	7.9	7.9	8	7
Résistance à la flexion 28j (MPa)	9.5	8.2	8.1	7.4

Il a constate que :

- La résistance à la compression augmente en fonction du temps pour tous les mélanges.
- Il est observé que tous les mortiers avec PV possèdent des résistances de compression à court terme plus faibles que celles du mortier de référence.
- La baisse de résistance de compression à jeune âge est la conséquence de l'absence de réaction des MV comme les autres matériaux pouzzolaniques qui ont une réaction d'assez lente avec un effet vers 56 jours ou plus.
- Les courbes d'évolution des résistances en flexion suivent sensiblement le même comportement que les résistances en compression. Pour toutes les concentrations de MV.
- les valeurs de résistance à la flexion des mortiers ont tendance à stabiliser au-delà de l'âge de 7 jours. Il n'y a pas de différence notable entre la résistance en flexion entre les différentes concentrations de MV et par rapport le mortier de référence.

## CHAPITRE 3: VALORISATION DES DECHETS DE VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

### ➤ A long terme

Les résultats de (Nguyen.H) [18]. sont représentés dans le tableau 3.7 :

**Tableau 3.7 :** L'évolution de la résistance à la compression et la flexion en fonction du temps à long terme des mortiers M0, M10, M20, M35 [18].

Ciment préparés	C+0% verre	C+10% verre	C+20% verre	C+35% verre
Résistance à la compression 28j (MPa)	39	32	36	22
Résistance à la compression 55j (MPa)	47	45	43	24
Résistance à la compression 112j (MPa)	49	48	46	27
Résistance à la flexion 28j (MPa)	5.8	6	5.2	4.1
Résistance à la flexion 55j (MPa)	6.1	6.1	6	4.5
Résistance à la flexion 112j (MPa)	6.4	6.2	5.8	4.9

Il a constate que :

- Les mortiers M10 et M20 Développent une résistance comparable à celle du mortier de référence, résistance qui atteint plus de 90% de la valeur de M0 aux âges de 56 jours et 112 jours.
- Ce gain de Résistance peut être attribué à un effet pouzzolanique des MV qui produisent, grâce à leur Finesse, un effet filler entre les grains du ciment.
- une légère croissance en fonction de temps est observée sur tous les résultats des mortiers M10, M20, M35. Cette croissance est négligeable par rapport à celle observée dans le cas de mortier de référence à court terme, mais elle assure nous pouvons conclure l'effet pouzzolanique des MV.
- Cette propriété pouzzolanique permet à la résistance en flexion du mortier de se développer au cours du temps.

#### **Conclusion**

D'après les trois études que nous avons choisies, la résistance mécanique augmente en fonction du temps et diminue en fonction du taux de substitution, cette diminution de résistance est expliquée par la nature de la réaction pouzzolanique (réaction lente) qui nécessite plus de temps pour développer les performances du ciment et mortier. Les résultats sont différents d'un essai à un autre. Cette différence dépend des conditions du travail, la qualité du ciment et la quantité de poudre de verre utilisé.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE TROISEME  
CHAPITRE**

- [1]. Kateb.Med.L., Utilisation des granulats de verre dans la fabrication des bétons architectural «cas des briques en bétons», Mémoire de maîtrise es sciences appliquées UNIVERSITE DE SHERBROOKE, Canada 2009.
- [2]. Bensaid.S., L'utilisation de la poudre de verre dans la composition du béton, Mémoire de master, Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie 2015.
- [3]. Slimani.H., Elaboration, mesure mécaniques et élastiques des verres  $Sb_2O_3-Li_2O-MoO_3$  ( $WO_3$ ), Mémoire de master, Med Khider, Biskra, Algérie 2014.
- [4]. Malika.N., Effet des oxydes alcalino- terreux et les métaux de transitions sur les propriétés physiques des verres d'oxydes basés sur  $Sb_2O_3$ , Med.Khider, Biskra, Algérie 2012.
- [5]. Saoud.H., L'influence de l'ajout de la poudre de verre et de la poudre de marbre sur le comportement physique et mécanique du ciment composé, Mémoire de master, Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie 2016.
- [6]. Salhi.K., Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton, mémoire de magister, Mohamed Khider, Biskra 2007.
- [7]. Ablam.Z., Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires Binaires, Mémoire de maîtrise es sciences appliquées, Sherbrooke, Canada 2009.
- [8]. Izemmouren.O., Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée, Thèse de doctorat, Mohamed Khider, Biskra, Algérie 2016.
- [9]. Aly Hussein.A., Optimisation et performance des bétons incorporant de la poudre de verre comme un remplacement partiel du ciment portland, Mémoire master, Sherbrooke Canada 2012.
- [10]. Shayan,A et Xu., Value-added utilization of waste glass in concrète Cernent and concrete research, 2004.

### CHAPITRE 3: VALORISATION DES DECHETS DE VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

---

[11]. Shayan.A ET Xu., Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete a field trial on concrète slabs, Cernent and concrète research, 2006.

[12]. Idir.R., Mécanisme d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique, Thèse de doctorat Cotutelle, Université de Toulouse (France) et Université Sherbrooke, Canada, 2009.

[13]. Shi.C et Wu.Y., Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrète containing glass powder, ACI materials journal, 2005.

[14]. Dumas.M., Étude sur la poudre de verre de source électronique et le contrôle de l'expansion due à la RAS dans les bétons architecturaux contenant des granulats de verre Mémoire de Master, Université De Sherbrooke, Canada, 2019.

[15]. Nara.Y., et Guenchouba.Dj., Etude de l'effet la finesse de la poudre de verre sur les caractéristiques physique et mécanique des mortiers, Master Académique, Ziane Achour Djelfa, Algérie, 2017.

[16]. Saoud.H., L'influence de l'ajout de la poudre de verre et de la poudre de marbre sur le comportement physique et mécanique du ciment composé, Mémoire Master, Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie, 2016.

[17]. Boulifa.M et Debabi.A., Utilisation de poudre de verre dans le mortier, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2017.

[18]. Hau. N., Valorisation du verre dans le béton Etude expérimentale du comportement de pâte de ciment et du mortier : rhéologie mécanique et durabilité, Université d'aix, Marseille 2013.

# CONCLUSION GENERALE

### CONCLUSIONS GENERALES

La présente étude est une recherche bibliographique sur qui s'intéresse à la valoriser des déchets et des sous produits de l'industrie dans la fabrication des ciment et mortiers. Il entre dans le cadre de la valorisation et le recyclage des matériaux locaux. Il consiste à l'étude de la substitution du clinker par la poudre de verre. Basé sur les résultats expérimentaux des études de recherche dans ce domaine, nous avons tiré les conclusions suivantes :

1. Le recyclage des déchets de verre dans l'industrie du ciment à des impacts positifs sur l'environnement, sur l'économie et sur la qualité des produits fabriqués à base de ces déchets.
2. Le verre se caractérise par une phase amorphe, ce qui rend le matériau intéressant et utilisable après broyage comme ajout entrant dans l'industrie cimentaire et la formulation des mortiers et des bétons.
3. Les résistances mécaniques dépendent fortement de la finesse de mouture de la poudre de verre. Plus la poudre est fine, plus la résistance augmente.
4. Une diminution de la résistance à court terme (2, 7, et 28 jours) des éprouvettes confectionnées avec ajout de verre par rapport à l'échantillon de référence. Cette diminution est expliquée par le fait que la réaction pouzzolanique n'est pas encore prédominante (effet prolongé de la pouzzolane).
5. Les résistances mécaniques des mortiers à base de la poudre de verre sont comparables avec celles du mortier de référence à long terme. Ce comportement est expliqué par la combinaison de deux effets : effet filler et effet de la réaction pouzzolanique.
6. Les masses volumiques des mortiers contenant la poudre de verre sont plus faibles que celles de l'échantillon de référence, ce qui peut être un avantage pour les structures lourdes.

**En perspective,** Les informations collectées sur le recyclage et sur l'incorporation de la poudre de verre, nous allons allonger la durée de cure des éprouvettes et aller jusqu'à une année et plus et de compléter le travail par une étude de la microstructure dont le but est de bien étudier la réaction pouzzolanique de la poudre de verre et son influence sur les performances de durabilité des ciments et des mortiers.